



Organisation des Nations Unies
pour l'alimentation
et l'agriculture



ÉCOLOGIE, CULTURE ET UTILISATIONS DU FIGUIER DE BARBARIE



ÉCOLOGIE, CULTURE ET UTILISATIONS DU FIGUIER DE BARBARIE

Comité éditorial

Paolo Inglese, *Università degli Studi di Palermo, Italie ;
Coordinateur Général de CactusNet*

Candelario Mondragon, *Faculté de Sciences Naturelles, Université Autonome de Queretaro,
Juriquilla Queretaro, Mexique*

Ali Nefzaoui, *ICARDA, Tunisie*

Carmen Sáenz, *Université du Chili, Chili*

Coordination

Makiko Taguchi, *FAO*

Harinder Makkar, *FAO*

Mounir Louhaichi, *ICARDA*

Appui éditorial

Ruth Duffy

Design et mise en page du livre

Davide Moretti, *Art&Design – Rome*

Traduction et appui éditorial pour la version Française

Timothée Cherié et Abderrahmane Ait Hamou

Publié par

l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
et le Centre International pour la Recherche Agricole dans les Zones Arides
Rome, 2018

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), ni du Centre International pour la Recherche Agricole dans les Zones Arides (ICARDA) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. La mention de sociétés déterminées ou de produits de fabricants, qu'ils soient ou non brevetés, n'entraîne, de la part de la FAO, ni de l'ICARDA aucune approbation ou recommandation desdits produits de préférence à d'autres de nature analogue qui ne sont pas cités.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles du/des auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement les vues ou les politiques de la FAO ni de l'ICARDA.

Photos de couverture et chapitre:
© Fotolia, iStock photo

La FAO encourage l'utilisation, la reproduction et la diffusion des informations figurant dans ce produit d'information. Sauf indication contraire, le contenu peut être copié, téléchargé et imprimé aux fins d'étude privée, de recherches ou d'enseignement, ainsi que pour utilisation dans des produits ou services non commerciaux, sous réserve que la FAO soit correctement mentionnée comme source et comme titulaire du droit d'auteur et à condition qu'il ne soit sous-entendu en aucune manière que la FAO approuverait les opinions, produits ou services des utilisateurs.

Toute demande relative aux droits de traduction ou d'adaptation, à la revente ou à d'autres droits d'utilisation commerciale doit être présentée au moyen du formulaire en ligne disponible à www.fao.org/contact-us/licence-request ou adressée par courriel à copyright@fao.org.

Les produits d'information de la FAO sont disponibles sur le site web de la FAO (www.fao.org/publications) et peuvent être achetés par courriel adressé à publications-sales@fao.org.

ISBN 978-92-5-130344-3 (FAO)
© FAO, 2018

SOMMAIRE

Préface	IX
Remerciements	X
Acronymes	XI
1 Histoire, économie et importance agro-écologique	1
<i>María Judith Ochoa et Giuseppe Barbera</i>	
Introduction	2
Histoire	2
Situation actuelle	5
Les Amériques	5
Afrique	7
Asie Occidentale	9
Australie	10
Europe	10
Perspectives	11
2 Origine et taxonomie d'<i>Opuntia ficus-indica</i>	13
<i>Roberto Kiesling et Detlev Metzger</i>	
Introduction	14
Origine et taxonomie d'<i>Opuntia ficus-indica</i>	14
Nombre de chromosomes	15
Etudes moléculaires	15
Distribution et naturalisation	16
Noms vernaculaires	17
Le rôle de la cochenille	18
Vue d'ensemble de la taxonomie et de la nomenclature	19
Conclusions	19

SOMMAIRE

3	Morphologie et anatomie de <i>platyopuntiae</i>	21
	<i>Loreto Prat et Nicolás Franck</i>	
	Introduction	22
	Système racinaire	22
	Le Cladode	23
	L'écorce	26
	Le bois	26
	Les boutons floraux	27
	Le grain de pollen	28
	Le fruit	29
4	Ecophysiologie et biologie de la reproduction des cactus cultivés	31
	<i>Paolo Inglese, Giorgia Liguori et Erick de la Barrera</i>	
	Introduction	32
	Le cycle CAM	32
	L'aptitude des sols à la culture du figuier de barbarie	35
	Assimilation de CO₂ et disponibilité de l'eau	35
	Réponse à la température	37
	Réponse à la lumière	38
	Biologie de la reproduction	38
	Productivité de biomasse	41
	Réponses potentielles au changement climatique	42
5	Ressources génétiques du Nopal (<i>Opuntia spp.</i>)	45
	<i>Candelario Mondragón Jacobo et Innocenza Chessa</i>	
	Introduction	46
	Exploration des ressources génétiques	46
	Banques de germoplasmes, collections de base et essais de cultivars	48
	Documentation des ressources génétiques	48
	Utilisation des outils moléculaires modernes pour expliquer la variabilité...	49
	Conservation des ressources génétiques de figuier de barbarie	50
	Utilisation : amélioration et sélection des germoplasmes	51
	Vers une utilisation durable du figuier de barbarie	52

6	Production de fruits et gestion post-récolte	53
	<i>Johan Potgieter et Salvatore D'Aquino</i>	
	Introduction	54
	Planification et mise en place du verger	54
	Conception et agencement du verger	58
	Mise en place	59
	Gestion du verger	60
	Récolte	69
	Des figues de barbarie prêtes à consommer	72
	Conclusions et perspectives futures	73
7	Production de fourrage et apports pour la nutrition animale	77
	<i>Jose C.B. Dubeux Jr., Hichem Ben Salem et Ali Nefzaoui</i>	
	Introduction	78
	Systèmes de production de fourrage basés sur les cactus	78
	Pratiques agronomiques	83
	Qualité du fourrage	87
	Utilisation	91
	Performances des animaux et qualité des produits	94
	Perspectives futures et besoin de recherche	96
8	<i>Nopalitos</i> ou cactus légume, production et utilisation	97
	<i>Candelario Mondragón Jacobo et Santiago de Jesus Méndez Gallegos</i>	
	Introduction	98
	Première utilisation et domestication	98
	Variétés <i>nopalito</i> légume	99
	Importance agricole de la culture du <i>nopalito</i>	100
	Systèmes de production de <i>nopalito</i>	101
	Pratiques de production	103
	Techniques de base pour la préparation	107
9	Elevage de cochenilles	109
	<i>Liberato Portillo et Ana Lilia Viguera</i>	
	Introduction	110
	Biologie	111
	L'élevage de cochenilles	112
	Ecologie	116

10 Maladies du figuier de barbarie	119
<i>Giovanni Granata, Roberto Faedda et María Judith Ochoa</i>	
Introduction	120
Maladies fongiques	120
Maladies bactériennes	125
Phytoplasmes et maladies virales	126
Désordres abiotiques	127
11 Insectes ravageurs du figuier de Barbarie	129
<i>Jaime Mena Covarrubias</i>	
Introduction	130
Insectes	130
Lutte intégrée pour les insectes ravageurs des cactus	136
12 Transformation et utilisation des fruits, des cladodes et des graines	139
<i>Carmen Sáenz</i>	
Introduction	140
Composition chimique et composants bioactifs	140
Caractéristiques technologiques	141
Technologies de transformation	142
Autres technologies	149
Autres produits	150
Conclusion	154
13 Propriétés nutritionnelles et médicinales dérivées des fruits et des cladodes	155
<i>Mónica Azucena Nazareno</i>	
Introduction	156
Aspects nutritionnels	156
Composés phytochimiques bioactifs dans les cactus	158
Propriétés médicinales	159
Perspectives	161

14 Biens et services écosystémiques de cactus	165
<i>Mounir Louhaichi, Ali Nefzaoui et Juan Carlos Guevara</i>	
Introduction	166
Amélioration des pâturages	167
Atténuation de l'érosion des sols	168
Clôture biologique/barrières végétales	171
Potentiel de séquestration du carbone	172
La culture en allée	173
Conservation de la biodiversité	175
Conclusion et recommandations	176
15 Invasion globale des cactus: contrôle, gestion et conflits d'intérêt	177
<i>Helmuth Zimmermann</i>	
Introduction	178
Les cactus comme un problème	178
Utilisation et conflits d'intérêt	189
Conclusions	191
16 Production de biogaz	193
<i>Maria Teresa Varnero et Ian Homer</i>	
Introduction	194
Utilisation des déchets de cactus pour la production de biogaz	194
Plantations d'<i>Opuntia</i> spp. pour la production de biogaz	195
Conception et utilisation du biodigesteur	196
Aspects économiques	198
Autres utilisations des bioénergies	199
17 Marketing, contraintes et stratégies de communication	201
<i>Marcos Mora</i>	
Introduction	202
Contexte de production et de mise en marché	202
Qualité perçue de la figue de barbarie : des attributs intrinsèques aux extrinsèques	206
Valeur des attributs et préférences des consommateurs	206
Stratégie de développement commercial proposée	207
Conclusions	208
Bibliographie	209



Préface

Le changement climatique est un des plus importants défis auquel le monde doit faire face aujourd'hui et dans le futur. Les sécheresses prolongées et la désertification font partie des problèmes rencontrés par de nombreux pays, particulièrement en Afrique et en Asie, où les populations rurales pauvres et les petits propriétaires sont les plus durement touchés. Si les populations doivent survivre dans des conditions encore plus extrêmes, leurs cultures doivent supporter sécheresse, hautes températures et sols pauvres.

Les cultures de cactus bénéficient d'une attention croissante à travers le globe, en particulier le figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*), grâce à leurs caractéristiques uniques leur conférant de la résilience aux conditions extrêmes mentionnées ci-dessus. Le figuier de barbarie est capable de pousser sur des terres où aucune autre culture n'est capable de croître ; il peut être utilisé pour restaurer des sols dégradés et constitue dans de nombreux pays, comme l'Éthiopie, l'unique culture sur laquelle on peut compter lorsque toutes les autres sont vouées à l'échec. Cette culture vient du Mexique - aujourd'hui encore le plus grand producteur et consommateur dans le monde - mais d'autres pays, dont le Maroc, l'Éthiopie, l'Afrique du Sud, le Kenya, l'Inde et le Pakistan, en augmentent la production et en diversifient les utilisations.

En plus d'être une culture résiliente, le figuier de Barbarie est de plus en plus apprécié pour ses multiples usages. Les fruits et les jeunes cladodes peuvent être consommés par les humains, et il y a un intérêt croissant pour son utilisation comme fourrage. Au Brésil, une plantation de plus de 400 000 ha dans la région du Nord-Est est un élément clé pour soutenir l'élevage dans cette région semi-aride du pays. La culture du figuier de barbarie pour le fourrage est aussi en train d'être adoptée en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud. De plus, ses propriétés médicinales et industrielles font l'objet de recherches et de promotion.

Le Réseau International de Coopération Technique du Cactus de la FAO-ICARDA (CactusNet) a été créé en 1993 pour appuyer la promotion de cette culture sous-utilisée. La première édition de ce livre, *Agroecology, cultivation and uses of cactus pear*, a été publiée en 1995. Durant les 20 dernières années les connaissances sur le figuier de barbarie se sont développées et cela est reflété par cette édition 2017 largement révisée.

Le dévouement de tous les experts qui ont contribué à cette édition est grandement apprécié et nous espérons que ce livre deviendra une ressource utile pour les pays intéressés par le développement ou l'augmentation de leur production de cactus. De plus, nous reconnaissons l'excellent travail de CactusNet et encourageons quiconque à nous rejoindre et à contribuer à l'augmentation des connaissances et leurs applications générées par le Réseau et ses partenaires.



Hans Dreyer

Directeur de la Division de production végétale et protection des plantes de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture



Andrew Noble

Directeur Général Adjoint de la Recherche Centre International de Recherche Agricole dans les Zones Arides (ICARDA)

Remerciements

C'est en août 1993 que le Réseau International du Figuier de Barbarie (CactusNet) a été créé, donnant suite à des premiers échanges à Santiago, au cours du Congrès International de la Figue de Barbarie organisé, en septembre 1992, par Fusa Sudzuki et Carmen Sáenz à l'Université du Chili. Eulogio Pimienta, un des éditeurs de la première version de ce livre, était aussi le premier Coordinateur Général du Réseau. En 1995, la Société Internationale des Sciences Horticoles (ISHS) a créé le Groupe de Travail sur le Figuier de Barbarie et la Cochenille et a très fortement contribué au développement de la connaissance de cette plante et de ses utilisations. Des articles publiés dans l'*Acta Horticulturae* du symposium du groupe de travail et dans des revues scientifiques ont eu un impact significatif sur la promotion du figuier de Barbarie. Aujourd'hui, 25 ans plus tard, nous sommes de retour au Chili, fiers de présenter la seconde édition de *Ecologie, Culture et Utilisations du Figuier de Barbarie*. La première édition était un miracle, considérée comme une « référence dans la littérature sur le figuier de Barbarie ». Nous étions au tout début du réseau. Pas d'e-mails possibles ! Seulement des disquettes et du courrier ! Vingt-six auteurs de 18 universités et instituts de recherche du Chili, d'Allemagne, d'Israël, d'Italie, du Mexique, du Pérou, d'Afrique du Sud et des Etats-Unis d'Amérique ont contribué. Pareillement à la première édition, la seconde est le résultat d'une coopération internationale. Certains des auteurs de la première édition sont toujours impliqués : Giuseppe Barbera, Carmen Sáenz, Candelario Mondragón, Giovanni Granata, Maria T. Varnero, Helmuth Zimmermann. Nous les remercions tous pour la longue route que nous avons parcourue ensemble. Mais nous remercions aussi tous les auteurs pour leur dévotion à cette culture et leur contribution enthousiaste à ce livre. Au total, nous avons réuni ensemble 30 auteurs de 10 pays, surpassant la première édition.

Au cours des 25 dernières années nous avons eu le soutien dévoué de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et du Centre International de Recherche Agricole dans les Zones Arides (ICARDA), et nous avons considérablement grandi. Enrique Arias, de 1992 jusqu'à sa retraite de la FAO en 2010, était pour le CactusNet une sorte de phare dans la tempête. Il nous a guidé et a servi la science et le développement technique pour les populations rurales pauvres avec dévotion et un engagement quotidien. Umberto Menini dans les premières années, puis Alison Hodder, tous deux de la Division de Production Végétale et Protection des Plantes de la FAO, ont également apporté leur soutien. Aujourd'hui, nous avons la bonne fortune de partager notre travail avec Makiko Taguchi qui a mené l'édition de ce livre. Nous sommes extrêmement reconnaissant de sa « ferme » gentillesse et de sa détermination. L'ICARDA est devenu un partenaire de notre Réseau quand Ali Nefzaoui en était le Coordinateur Général ; le partenariat FAO-ICARDA a créé les conditions nécessaires pour poursuivre le développement des activités de CactusNet. Ce livre a été rendu possible grâce au soutien de la FAO et de l'ICARDA, avec une contribution opportune de l'Agence Allemande pour la Coopération Internationale (GIZ).

Nous remercions tous les membres de CactusNet. Nous sommes fiers d'appartenir à cette communauté et d'y partager science et amitiés. En effet, ce livre est dédié à Enza Chessa, un membre de notre communauté qui a passionnément soutenu la science ainsi que l'amitié et la loyauté. Elle a été capable de sourire jusqu'à la fin, et nous lui sourions en retour en notre âme.

Permettez-nous de finir avec les mêmes mots que ceux utilisés pour la première édition, que nous croyons fermement encore valides : *Nous espérons sincèrement que ce livre jouera un rôle important dans l'accroissement des connaissances et de l'usage du figuier de Barbarie, compte tenu de son potentiel dans l'agriculture et l'économie des zones arides et semi-arides du monde.*

Les Editeurs

Acronymes

ADF	Acid detergent fibre
ADL	Lignine insoluble dans les détergents d'acide sulfurique
ADN	Acide désoxyribonucléique
AEC	Avant l'époque commune
AFLP	Polymorphismes de longueur des fragments amplifiés
AG	Acide gibbérellique
AGPI	Acide gras polyinsaturé
AGS	Acide gras saturé
AGV	Acide gras volatile
AIB	Acide indole-butyrique
ALENA	Accord de Libre Echange Nord-Américain
ANADEC	Association Nationale pour le Développement du Cactus (Maroc)
AOC	Appellation d'Origine Contrôlée
ARN	Acide Ribonucléique
ARS	Service de Recherche Agricole (Etats Unis d'Amérique)
AT	Azote total
a_w	activité de l'eau
BS	Base sèche
CactusNet	Réseau International du Figuier de Barbarie (FAO)
CAI	Indice de surface de cladode
CAM	Métabolisme acide crassulacéen
CC	Coupé au couteau (cladodes)
CE	Conductivité électrique
CECCAM	Centre d'Etude des Changements dans la Campagne Mexicaine
CENARGEN	Centre National de Recherche pour les Ressources Génétiques et les Biotechnologies
CEZA	Centre Agricole pour les Zones Arides (Chili)
CIF	Centre de Recherche sur le Fourrage (Bolivie)
CIREN	Centre d'Information des Ressources Naturelles (Chili)
CIRNO	Centre de Recherche pour la Région du Nord-Ouest (Mexique)
CMC	Carboxyméthylcellulose
CNR	Conseil National de la Recherche (Italie)
CONACYT	Conseil National de Science et Technologie (Mexique)
CONICET	Conseil National de Recherche Scientifique et Technique (Argentine)
cp-SSR	Répétition de séquence simple de chloroplaste
CRUCEN	Centre Régional de l'Université Centre Nord (Mexique)
CS	Concentré séparé (aliment)
DESA	Département des Affaires Economiques et Sociales (Nations Unies)
DFPP	Densité du flux de photons photosynthétiques
DHC	Degrés heure de croissance
DO	Distillation osmotique
DRO	Dérivés réactifs de l'oxygène
EAG	Equivalent acide Gallique
ED	Equivalent dextrose
EM	Energie métabolisable

EPDM	Ethylène-propylène-diène terpolymère
ERNC	Energie renouvelable non-conventionnelle
EST	Marqueur de séquence exprimé
FAUANL	Faculté d'Agronomie de l'Université Autonome de Nuevo León (Mexique)
FI	Première pousse (fleurs)
FIA	Fondation pour l'Innovation Agraire (Chili)
FII	Deuxième pousse (fleurs)
FOB	Franco de port
GMQ	Gain moyen quotidien
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIZ	Agence de Coopération Internationale Allemande pour le Développement
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
GRIN	Réseau d'Information des Ressources de Germoplasmes
HDPE	Polyéthylène haute densité
HF	Tranché avec un hachoir à fourrage (cladodes)
HI	Indice de récolte
HR	Humidité relative
HTTC	Haute température et temps court
IADIZA	Institut Argentin de Recherche des Zones Arides
ICARDA	Centre International pour la Recherche Agricole dans les Zones Arides
IFAD	Fond International pour le Développement Agricole
IIZD	Institut de Recherche des Zones Désertiques (Mexique)
IMZ	Imazalil
INCA	Institut National de Sciences Agricoles (Mexique)
INEGI	Institut National de Statistiques et de Géographie (Mexique)
INIFAP	Institut National pour la Forêt, l'Agriculture et l'Elevage (Mexique)
INRAT	Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie
IQF	Individually quick frozen littéralement en français : « rapidement congelé individuellement »
ISHS	Société Internationale pour les Sciences Horticoles
ISPA	Institut des Sciences de Production d'Aliment (Italie)
ISSR	Répétition de séquence simple interne
IST	Indice de surface de tige
ITS	Espaceurs internes transcrits
Kc	Coefficient cultural
LAI	Indice de surface foliaire
LI	Lutte intégrée
MF	Microfiltration
MO	Matière organique
MS	Matière sèche
MST	Matière sèche totale
NALPGRU	Unité Nationale de Ressources Génétiques des Plantes des Terres Arides (Etats-Unis d'Amérique)
NDF	Fibres insolubles dans les détergents neutres
NEMA	Autorité Nationale de la Gestion de l'Environnement
NF	Nanofiltration
nrITS	Espaceurs internes transcrits nucléaires ribosomiaux
ODEPA	Office d'Etudes et Politiques Agraires (Ministère de l'Agriculture, Chili)

OEP	Office de l'Élevage et des Pâturage
OI	Osmose inverse
ONG	Organisation non gouvernementale
PAR	Rayonnement photosynthétiquement actif
PB	Protéine brute
PCR	Polymerase Chain Reaction
PDF	Période de développement du fruit
PEP	Phosphoénolpyruvate
PF	Pois frais
Pn	Photosynthèse nette
PO	Période d'oviposition
PPO	Polyphénol Oxidase
PROAGRO	Programme de Développement Durable de l'Agriculture (Bolivie)
PS	Pois sec
PSE	Pois sec estimé
PVA	Alcool polyvinylique
PVC	Polychlorure de vinyle
RAPD	Amplification aléatoire d'ADN polymorphe
RCP	Representative Concentration Pathways
RTM	Ration totale mélangée (aliment)
RUE	Efficacité d'utilisation de la pluie
SAGARPA	Secrétariat de l'Agriculture, l'Élevage, du Développement Rural, de la Pêche et de l'Alimentation (Mexique)
SIAP	Système d'Information de l'Agriculture et le Pêche (Mexique)
SINAREFI	Système National de Ressources Génétiques de Plantes pour l'Alimentation et l'Agriculture (Mexique)
SLP	San Luis Potosí
SNICS	Service National d'Inspection et de Certification des Semences (Mexique)
SOMECH	Société Mexicaine des Sciences Horticoles
SPP	Suppression de la pousse de printemps
SSR	Répétition de séquence simple
SST	Solides solubles totaux
TBZ	Thiabendazole
TCA	Taux de croissance absolue
TLB	Trachéides à larges bandes
UF	Ultrafiltration
UFC	Unité formant colonie
UFRPE	Université Fédérale Rurale de Pernambuco (Brazil)
UNAM	Université Nationale Autonome du Mexique
UNDP	Programme des Nations Unies pour le Développement
UNSO	Office pour le Combat contre la Désertification et la Sécheresse
USDA	Département de l'Agriculture des Etats-Unis
UTN	Unité de Turbidité Néphélométrique
UV	Ultraviolet
WUE	Efficacité d'Utilisation de l'Eau
W_w	Pois de l'eau



01

Histoire, économie et importance agro-écologique

María Judith Ochoa^a et Giuseppe Barbera^b

^a Université Nationale de Santiago del Estero, Argentine

^b Université de Palerme, Italie



Histoire, économie et importance agro-écologique

INTRODUCTION

« La chose la plus importante après la création du monde... est la découverte des Indes ». Ces mots, adressés en 1552 à l'empereur Charles V par Francisco Lopez de Gomara, auteur de la fameuse *Historia General de las Indias* (Histoire Générale des Indes, 1552), témoignent de la conscience des conquérants Européens des conséquences possibles de la rencontre entre l'Ancien et le Nouveau Monde. Selon Crosby (1972), les conséquences de « l'échange colombien » ont été particulièrement importantes pour la faune et la flore des différentes régions de la

planète et plus spécialement pour l'agriculture. A travers les siècles, ces échanges ont continué et n'ont pas cessé de nous émerveiller. Durant les décennies suivant le premier voyage de Colomb, la vitesse des échanges de plantes et d'animaux entre les deux Mondes a varié. Les conquistadors ont rapidement imposé leurs cultures traditionnelles dans les Amériques : ils avaient l'avantage scientifique et technique et souhaitaient recréer les conditions et habitudes de vie de leur pays d'origine. Le transfert dans le sens opposé a pris

plus de temps du fait que les Européens étaient principalement intéressés par les produits capables de générer des profits immédiats. Quand finalement ils s'intéressèrent à la flore locale, c'était par curiosité scientifique ou par goût pour l'exotisme ; ils n'étaient pas conscients du potentiel de ces plantes comme aliments ou comme marchandises d'intérêt économique. Au contraire, les Espagnols étaient au début méfiants de la culture des peuples qu'ils avaient colonisés, et ils considérèrent leurs habitudes alimentaires avec beaucoup de prudence et par pure nécessité (Doria, 1992). Pour ces raisons, il a fallu des siècles avant que les opuntias - une des plantes les plus importantes économiquement de la civilisation Aztèque - soient appréciés à leur juste valeur dans les diverses régions du monde.

HISTOIRE

Lorsque les Espagnols arrivèrent en 1492 sur l'île d'Hispaniola (aujourd'hui Haïti et la République Dominicaine) dans la mer des Caraïbes, les autochtones leurs présentèrent le fruit rouge de l'*Opuntia*, alors appelé « tuna », du mot caribéen *tun*. Une anecdote amusante rapportée par le chroniqueur fait référence à la façon dont les nouveaux arrivants, après avoir observé la couleur de leur urine, pensèrent qu'ils avaient été empoisonnés et qu'ils saignaient à mort (Kiesling, 1999a). Les premiers Européens à accoster sur le continent américain se sont rendu compte du rôle important – culturel et économique – des opuntias dans le monde préhispanique. Quand le premier conquistador, H. Cortés, atteignit le plateau Mexicain en 1519, il ne pouvait pas manquer de constater partout la présence de *nopalli* (le mot Nahuatl pour la plante), et à son entrée à Tlaxcala (Diaz del Castillo, 1991), ils furent accueillis avec des figues de Barbarie (*nochtli*). La figue de Barbarie faisait partie de la culture Aztèque : le drapeau de l'armée Aztèque montre un aigle sur un figuier de Barbarie mangeant un serpent ; et la capitale de l'empire était appelée Tenochtitlan, c'est-à-dire « le figuier de Barbarie sur la roche » (aujourd'hui Mexico). Cette même scène est dépeinte sur la première page du Codex Mendoza, représentant le centre de l'Univers (Berdan and Anwart, 1992) (**Figure 1**).

Les conquistadors commencèrent à manger les fruits. Oviedo y Valdés - le premier auteur à décrire le fruit et la plante - écrivit que ses camarades « connaissaient et mangeaient ce fruit avec plaisir » à Hispaniola en 1515. Il a aussi fourni une description précise (en particulier dans un travail plus tardif, écrit en 1535) de la morphologie de la plante. Selon sa description, la plante ne poussait pas seulement sur Hispaniola mais aussi sur d'autres îles et dans d'autres régions des Indes. De plus, « ses graines et sa peau sont comme celles de la figue et sont aussi savoureuses ».

D'autres auteurs mentionnent le succès du fruit parmi les populations locales et les Espagnols (Donkin, 1977). En particulier Oviedo y Valdés, Toribio de Motolinia et Galeotto Cei (1539-1553) décrivent plusieurs espèces, mettant souvent en valeur les divers usages autres qu'alimentaires : comme



Figure 1
Représentation de l'emblème de Tenochtitlan du Codex Mendoza, le figuier de Barbarie comme centre de l'Univers

plante médicinale (la variété « arbre soudeur » était utilisée pour soigner les fractures), comme source d'eau et comme barrières ou clôtures. La présence de différentes espèces est soulignée par Toribio de Montolinia, qui mentionne « de nombreuses espèces » et par Bernardino de Sahagun et Francisco Hermindez (vers 1570), qui citent respectivement 13 et 9 espèces. Malgré cet intérêt, il n'y a pas eu de réelle évaluation économique des fruits.

D'un autre côté, la très prisée teinture rouge, *nocheztlí*, était très appréciée des espagnols, qui l'appelaient *grana cochinilla*. La teinture est riche en acide carminique et elle est extraite du corps de *Dactylopius coccus*, une cochenille qui vit sur les cladodes (Reyes Agüero et al., 2005). La teinture rouge était hautement considérée pour ses qualités commerciales et a probablement été envoyée, en petites quantités, très tôt en Europe. Il est certain que l'Espagne en demandait dès 1521 et qu'en 1544, selon Cervantes de Salazar, « une grande quantité est importée à un coût élevé par l'Espagne » (Donkin, 1977).

Le nouveau produit rencontrait un fort succès grâce à son intense couleur rouge. C'était le bien d'importation d'Amérique le plus demandé à la fin du seizième siècle, surpassé seulement par les métaux précieux. La nature précise de la poudre (*grana*) a longtemps été sujet à débats, jusqu'à ce que Hartsoeker (1694), Van Leenwenhoek (1704) et De Ruescher (1729) en spécifient l'origine animale (Donkin, 1977).

Cependant, malgré l'importance économique de *grana*, la plante hôte n'a pas été introduite en Europe. Il y avait une interdiction d'exporter les cladodes infectés et les Espagnols ont maintenu un monopole durant deux siècles, jusqu'à ce qu'un docteur Français, Thiery de Menonville, ramène l'insecte au territoire Français (Haïti) en 1777. L'insecte a été signalé en Inde en 1795 et en Europe au début du dix-neuvième siècle, où des tentatives de son élevage en France, en Espagne et en Italie échouèrent. Pourtant, en 1853, il y avait 14 plantes reproductrices en Algérie et en 1850-1860 les îles Canaries exportaient déjà deux fois la quantité de *grana* venant d'Amérique (Donkin, 1977). Donc, puisque la plante n'a pas été introduite pour des raisons économiques, on peut conclure que les Européens étaient principalement attirés par sa forme, qui était totalement nouvelle pour eux.

En effet, les voyageurs Européens portaient à la recherche de plantes inhabituelles (l'Europe était dans une période de « Cabinet des Curiosités » et *Wunderkammern*) et le figuier de Barbarie faisait l'affaire. Les premières représentations du figuier

de Barbarie et d'autres cactus columnaires, se trouvent dans *Historia Natural y General de las Indias* (Histoire Naturelle et Générale des Indes), écrit par l'officier espagnol Gonzalo Fernando Oviedo y Valdés en 1536 (**Figure 2**) (les informations écrites ont été notées plus tôt, au cours du second voyage caribéen de Colomb). Oviedo y Valdés écrivit : « Je n'arrive pas à me décider si c'est un arbre ou un des plus horribles monstres parmi les arbres. » Cependant, ni ses mots ni ses peintures ne sont suffisants pour fournir une description précise : « Peut-être Berreguete ou d'autres grands peintres tels Léonard de Vinci que j'ai rencontré à Milan, ou Andréa Mantegna pourraient mieux les dessiner... »

Leur introduction en Europe n'a pas été documentée ; cependant elle s'est faite avant 1552, quand Lopez de Gomara a écrit au sujet du « nopal », considérant comme acquis que la plante était déjà bien connue en Espagne (Donkin, 1977). La plante était *O. ficus-indica* ou - comme soutenu par Berger (1912a)

- *O. amyclaea*. Les premiers opuntias ont probablement crû dans les environs de Séville ou Cadix, le terminus des échanges avec les Indes (Donkin, 1997) ; ils se sont ensuite propagés aux luxueuses propriétés des manoirs aristocratiques et aux jardins botaniques. Il est rapporté qu'ils ont été présentés en Italie vers 1560,

en Allemagne et aux Pays-Bas en 1583, et en Angleterre en 1596 (Donkin, 1977).

Il a immédiatement été bien reçu en tant que curiosité et décoration. Pier Andrea Mattioli - qui a été le premier à produire des dessins basés sur des plantes cultivées en Europe en 1558 - écrivait que « cette plante mérite à juste titre d'être incluse dans les miracles de la nature ». L'édition de 1568 de son *Discorsi* incluait deux tableaux témoignant de la curiosité générale qui entourait l'espèce. Les fruits n'étaient probablement pas appréciés - ils atteignaient à peine la maturité au nord de l'Italie - et Mattioli rapportait les mots de Oviedo y Valdés citant un de ses supposés terribles effets : en les mangeant, l'urine devenait rouge.

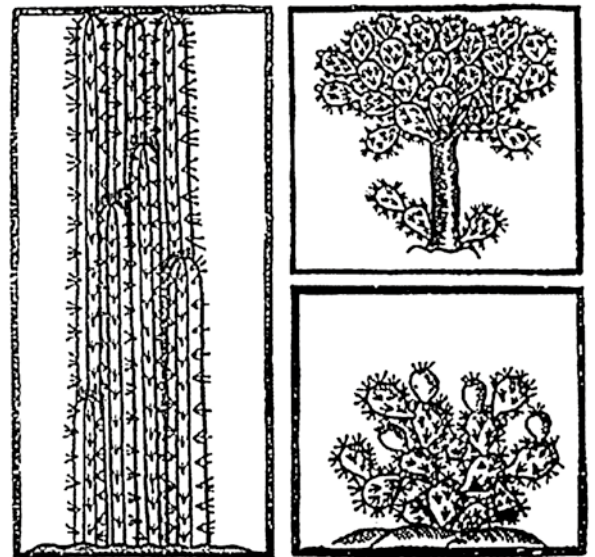


Figure 2
Dessins de cactus columnaires et de deux espèces de figuiers de Barbarie par Oviedo y Valdés, 1535

Les Espagnols ont emporté le figuier de Barbarie - et aussi très probablement *Dactylopius coccus* - au Pérou, bien que d'autres cochenilles étaient utilisées pour teindre avant la période Hispanique (De Acosta, 1590). En Argentine, des teintures rouges pour tissus, habits et « ponchos » (De Acosta, 1590) étaient élaborées en utilisant des cochenilles indigènes. Les usages médicaux des cactus et ses dérivés ont été documentés dans *Medicina en el Paraguay natural* (Médecine dans le Paraguay naturel), 1771-1776, écrit par José Sánchez Labrador ; il y décrit les usages de la *Cochinilla gusano de la grana* (cochenille verte) contre la fièvre et la folie, comment le fruit était utilisé comme rafraîchissement et les graines comme astringent (Ruiz Moreno, 1948).

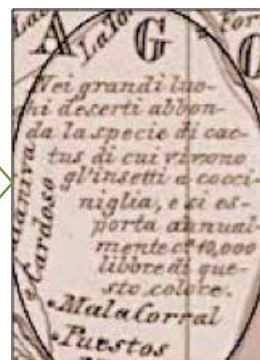
Une publication de John Arrowsmith (London, 1842) sur les topographies de Plata et ses provinces indique que la province de Santiago del Estero au nord de l'Argentine est une grande zone de production de grana (**Figure 3**).

En 1580, Gian Vettori o Soderini rappelait les origines Mexicaines du fruit et la manière dont, comme le paon, il réveillait l'émerveillement. Vers la fin du siècle, Agostin del Riccio déclara que le figuier de Barbarie était une plante idéale pour le jardin d'un roi (Tangiorgi Tomasi e Tosi, 1990). De nombreuses œuvres d'art intègrent l'image du figuier de Barbarie. Une merveilleuse planche aquarellée du *Iconographia Plantarum* d'Ulisse Aldrovrandi a aussi été réalisée à la fin du seizième siècle. En 1600, l'évêque de Eichstätt commanda l'*Hortus Eystettensis* qui devait contenir toutes les plantes du jardin du palais ; il comprend un dessin de l'espèce. « Le Pays de Cocagne » de Bruegel l'Ancien (1567, aujourd'hui au musée *Alte Pinakhotek* de Munich) contient aussi un *Opuntia*. A la magnifique

Piazza Navona de Rome, en 1648-1651, Gian Lorenzo Bernini a sculpté la Fontaine des Quatre-Fluves, conçue par Borromini, représentant des cladodes de figuier de Barbarie le long du Rio de la Plata. Dès le dix-septième siècle, il y a des preuves de la présence des *Opuntias* en Europe : un xylographe d'A. Switzer (1650, aujourd'hui à la Bibliothèque Nationale Centrale de Florence) montre le figuier de Barbarie parmi d'autres plantes dans le jardin d'Eden ; et en 1650/1651, J. Bahllin écrivit : « il est cultivé dans les jardins suspendus des manoirs des nobles ».

Dans les régions du nord, sa culture était seulement possible dans des espaces privilégiés du fait que, pour survivre à l'hiver, les plantes devaient être bien abritées ou placées dans des serres. Dans les régions méditerranéennes, au contraire, le climat était idéal et les opuntias vite naturalisés, sont devenus un des éléments les plus communs et les plus représentatifs du paysage. La plante s'est répandue le long de la côte Méditerranéenne : les oiseaux mangeaient leurs fruits, les Maures retournèrent en Afrique du Nord depuis l'Espagne et elle était aussi embarquée pour combattre le scorbut (causé par un manque de vitamine C), car les cladodes tolèrent facilement les longs trajets sans perdre leur capacité de s'enraciner (Kiesling, 1999a). Au cours du dix-huitième siècle, les opuntias se sont diffusés en l'Afrique du Sud (1772), l'Inde (1780), la Chine (1700) et en Indochine, bien qu'il soit possible que la plante ait été introduite dans ces pays avant cette époque (Donkin, 1977). L'usage emblématique de cette plante est rapidement devenu populaire durant le dix-neuvième siècle dans l'art, les dessins, le marketing et même en politique (Barbera et Inglese, 2001). De nombreux artistes, dont Diego Rivera, Frida Kahlo, Roy Lichtenstein, Felice Casorati et Renato Guttuso l'ont utilisée dans leurs travaux.

Figure 3
Atlas géographique de
Santiago del Estero,
Argentine



Dans le plus grand désert on peut trouver une abondance d'espèces de cactus sur lesquels vivent la cochenille, environ 10 000 livres (4500 Kg) de ce colorant sont exportés.

SITUATION ACTUELLE

Les Opuntias font maintenant partie de l'environnement naturel et des systèmes agricoles et *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. est l'espèce ayant la plus grande importance économique dans le monde (Kiesling, 1999a). Ils sont cultivés en Amérique, en Afrique, en Asie, en Europe et en Océanie (Casas et Barbera, 2002). On peut les retrouver du Canada à la Patagonie en Argentine, du niveau de la mer jusqu'à 5100 m d'altitude au Pérou (Bravo Hollis et Scheinvar, 1995). Quand ils ont été découverts pour la première fois par les explorateurs Européens, les opuntias étaient distribués de la Mésoamérique à Cuba et à d'autres îles caribéennes (Griffith, 2004). Ils sont devenus invasifs dans les zones ayant une saison des pluies caractérisée par des températures élevées, par exemple en Afrique du Sud et en Australie (Wessels, 1988a ; Zimmermann *et al.*, 2009). Dans les climats méditerranéens, l'invasion naturelle est limitée par l'humidité et les températures froides d'hiver qui contrastent avec les conditions chaudes et sèches des étés (Barbera, 1995).

Les usages traditionnels et populaires du figuier de Barbarie dans un grand nombre de pays ainsi que ses multiples fonctions ont attiré l'attention des agriculteurs, des éleveurs et de la communauté scientifique.

LES AMERIQUES

Argentine

L'Argentine a une surface de production de figuiers de Barbarie de 1 650 ha ; 80% se situent dans la région du nord-est, le reste est dispersé dans le centre et Cuyo (Targa *et al.*, 2013). Le principal cultivar est une sélection locale appelée « Amarilla sin espinas » (jaune sans épines) (Ochoa, 2003). La production est destinée aux marchés nationaux de Cordoba et Buenos Aires. Au cours des 5 dernières années, pendant les saisons sèches, les producteurs ont utilisé *Opuntia ficus-indica* comme fourrage. Les instituts de recherche ont commencé à intégrer le figuier de Barbarie à leurs programmes et projets de recherche.

Bolivie

Opuntia ficus-indica est bien connu en Bolivie, où il a de nombreux usages. La production de figuier de Barbarie a été développée à Cochabamba, Chuquisaca, Sucre, Tarija et La Paz, dans des zones recevant 350-640 mm de précipitation par an et à des altitudes de 1500-3000 m au-dessus du niveau de la mer.

Plus récemment, le figuier de Barbarie a été promu dans les départements de Pasorapa et Cochabamba, soutenu par le Centre de Recherche sur le Fourrage (CIF) et l'Université de San Simón à Pasorapa City, dans le cadre du

Programme de Développement Durable de l'Agriculture (PROAGRO). Dans la région de la Vallée et Chaco, la production de figuier de Barbarie est actuellement en train d'augmenter pour répondre à la demande de fourrage pour le bétail dans les zones arides et semi-arides de Bolivie (M. Ochoa, communication personnelle).

Brésil

Le Brésil a une surface de production de 500 000 ha (J. Dubeaux, communication personnelle) située dans la région du Nord-Est, dans les états de Paraíba, Pernambuco, Sergipe et Alagoas, et récemment étendue à d'autres états tels que Bahia, Río Grande del Norte et Ceara. Il y a un grand nombre de petits producteurs et la majorité de la production est destinée au fourrage. Le Brésil est fier d'avoir le plus grand système de production de figuier de Barbarie d'Amérique du Sud et a le plus haut niveau de production et de technologie en production intensive de fourrage. Dans cette région, *O. ficus-indica* atteint les plus hauts niveaux de production du monde, en masse fraîche et en matière sèche.

Chili

Les zones de production de figuier de Barbarie couvrent 934.4 ha au Chili sans changements significatifs durant la dernière décennie. Les principales aires de production du fruit sont la région Métropolitaine, et les régions de Coquimbo et Valparaíso (ODEPA, 2016). *Opuntia ficus-indica* produit deux récoltes par an sans interventions techniques : la première entre février et avril, la seconde de juillet à septembre. La seconde récolte offre à peine le tiers de la première mais elle bénéficie de meilleurs prix (Sudzuki Hills *et al.*, 1993; Sáenz *et al.*, eds, 2006). La production est principalement destinée au marché national pour la consommation en fruits frais. En conséquence des projets de ces dernières années, il y a un intérêt croissant pour l'utilisation de cladodes comme ingrédient - en marmelades ou *nopalitos* - dans l'alimentation chilienne.

Pérou

Actuellement 60% de la culture du figuier de Barbarie est destinée à la production de cochenilles et 40% pour le marché des fruits frais. Ces dernières années l'industrie s'est développée avec la transformation de fruits en nectars.

La culture Péruvienne de figuiers de Barbarie se fait plus pour la consommation domestique que pour l'exportation. La teinture rouge de cochenille est produite sur 10 000 ha dans les régions de Huarochirí et Ayacucho dans des plantations intensives (80% de la surface) ou semi-sauvages. En 2012, l'association des producteurs de cactus et de cochenille de Huarochirí a produit plus de 5 000 tonnes de figues de Barbarie pour le marché



local ; 'Blanca' et 'Morada' sont les variétés les plus importantes.

Mexique

Au Mexique, les opuntias ont la plus grande diversité génétique et le plus haut niveau de consommation (Reyes Agüero *et al.*, 2005). Les principales espèces utilisées au Mexique sont : *O. ficus-indica*, *O. joconoxtle*, *O. megacantha* et *O. streptocantha*. S'y ajoutent *O. robusta*, *O. streptacantha*, *O. leucotricha*, *O. hyptiacantha* et *O. chavena* qui sont récoltés dans la nature sur 3 millions d'hectares dans les zones arides et semi-arides avec des sols pauvres à Sonora, Baja California, Baja California Sur, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato, Querétaro et Hidalgo.

Les premières méthodes de culture modernes avec les meilleures variétés de figuiers de Barbarie ont été développées dans les années 1940 et 1950 dans les états de Mexico, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco et Guanajuato. Ces systèmes ont connu leur apogée en 1985, étant le résultat de programmes sociaux débutés vers la fin des années 1970 (Pimienta Barrios, 1990). Aujourd'hui, la production de figuier de Barbarie est distribuée parmi différents états, principalement dans le District Fédéral, l'Etat de Mexico, San Luis Potosí, Zacatecas, Tamaulipas, Aguascalientes et Guanajuato (SIAP, 2014). La figue de Barbarie est la sixième culture de fruit au Mexique, après l'orange, l'avocat, la banane, la mangue et la pomme ; il est plus important que la pêche, la goyave ou encore le raisin de table (SIAP, 2014).

L'histoire récente du figuier de Barbarie comme culture au Mexique présente des vicissitudes. Au cours des années 1970 et au début des années 1980, la culture a été fortement subventionnée par des programmes gouvernementaux et considérablement promues comme alternative aux haricots secs et au maïs. La vulgarisation était intense et expérimentale, basée sur les ressources techniques limitées qui étaient disponibles. De nombreux agriculteurs ont commencé à planter et à produire des fruits sans que le marché n'ait été correctement développé. Dans cette période, le marché, principalement national, était sujet à des prix extrêmement capricieux. En 1985, basé sur l'évaluation des besoins et des problèmes de la culture, le gouvernement encouragea les organisations de producteurs impliquant tous les acteurs de la chaîne de production : les producteurs, les grossistes et les détaillants et les agro-industriels. La recherche se développa, mais était restreinte par le manque récurrent de financements adaptés. Ces changements étaient cohérents avec la tendance générale : les producteurs Mexicains entraient sur le marché mondial et étaient confrontés à la concurrence des producteurs étrangers tout en étant en position d'investir les marchés d'exportation.

Dans les régions semi-arides centrales du Mexique, le figuier de Barbarie est aujourd'hui la plus fiable et même la plus profitable des options pour valoriser les terres semi-arides sans irrigation. Dans les zones exposées à la sécheresse, c'est la culture de choix comparée au maïs ou aux haricots secs, quand dans les sites légèrement plus cléments, le figuier de Barbarie complète le revenu généré par ces produits de base. Les chiffres disponibles illustrent cette importance : la surface plantée couvre 53 876 ha, c'est la cinquième culture dans le pays ; environ 20 000 familles tirent un revenu de la culture du figuier de Barbarie ; et la production globale annuelle a atteint 428 763 tonnes an⁻¹ (Gallegos Vázquez *et al.*, 2013). La production pour la consommation en légume - caractérisée par l'utilisation de petites parcelles - représente 12 000 ha additionnels de surface plantée.

Des **changements significatifs dans la production de figuier de Barbarie** ont eu lieu au Mexique durant les deux dernières décennies :

- Une lente mais progressive adoption de l'irrigation par gouteurs dans les zones semi-arides - une pratique inconnue au siècle passé.
- L'introduction du figuier de Barbarie dans des zones plus clémentes, avec un régime de précipitations moins limitant et de meilleurs sols - localisées dans les régions montagneuses du centre et dans certaines régions subtropicales du centre-sud et de l'ouest du pays.
- Une augmentation de l'utilisation de technologies pour nettoyer mécaniquement les fruits.
- L'utilisation de nouveaux matériaux pour l'emballage et de nouvelles présentations commerciales - étant donnée la large présence des fruits de cactus dans les supermarchés dans les grandes et moyennes villes et l'intérêt renouvelé dans le marché d'exportation.

Un vif intérêt pour les propriétés nutritionnelles de figue de barbarie et les effets positifs sur la santé humaine attribués à la consommation régulière de fruits et des tendres cladodes a abouti, depuis le début du siècle, à une myriade d'études scientifiques. La production de fourrage, d'autre part, s'est avérée bénéfique au niveau expérimental et niveau semi-commercial, mais n'a pas décollé - peut-être en raison de l'abondance des fourrages standards, le faible revenu des systèmes traditionnels de la production animale et la perte de terrains de parcours.

Le figuier de Barbarie dans les jardins familiaux ou *nopaleras de solar*

Ces jardins se trouvent dans les espaces ruraux, puisque les figues de Barbarie sont un élément important de l'alimentation dans le Plateau Central et le nord. Les *Nopaleras de solar* sont cultivés à Zacatecas, San Luis



Potosí, Guanajuato et Aguascalientes, principalement pour l'autoconsommation ou la vente sur les marchés locaux.

Production de *nopalitos* légumes

La culture de *nopalitos* - de jeunes cladodes tendres pour la consommation humaine utilisés dans la cuisine mexicaine - dépend d'une sélection des meilleures variétés. La plus grande aire de production est dans Mexico, dans le quartier de Milpa Alta, où des programmes de recherche ont soutenu et développé la production depuis 1950. Cette zone est la plus importante dans le pays en termes de qualité et pour ses hauts niveaux de rendement. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. est la plus importante espèce pour la production de *nopalitos*.

Etats-Unis d'Amérique

Dans les Etats-Unis d'Amérique, au temps de la colonisation de la Californie, les Frères Franciscains établirent la première plantation. Au début du vingtième siècle, des sélections créées par Luther Burbank étaient largement utilisées dans l'alimentation humaine et animale. Aujourd'hui, le figuier de Barbarie est cultivé pour la production de fruits en Californie, où il y a 120 ha en production intensive (« D'Arrigo Bros » a enregistré la figue de Barbarie en 1928) (P. Felker, communication personnelle). Au Texas, en Arizona et dans une partie de la Californie, *O. lindheimeri* est souvent utilisé comme fourrage de secours (Russels et Felker, 1987a). Il y a aussi quelques petites entreprises basées sur la transformation du fruit en gelée.

Stephen D'Arrigo émigra vers la Côte Est en 1911 à l'âge de 17 ans. Il a commencé à cultiver à San Jose des légumes comme le brocoli et le fenouil (commun dans son pays natal mais difficilement accessible en Amérique) et est devenu un distributeur de figues de Barbarie en l'expédiant vers l'est à la fin des années 1920. En 1930, il a déposé la marque « Andy Boy », avec un logo représentant Andrew, son fils de 6 ans. Quand Stephen mourut en 1951, Andrew reprit l'entreprise familiale ; aujourd'hui âgé de 87 ans, il est toujours à la tête de l'entreprise, et a un intérêt particulier pour les figuiers de Barbarie de la firme. La culture du figuier de Barbarie dans la vallée de Santa Clara a traversé plusieurs cycles de déclin et d'expansion au cours de la Grande Dépression, la Seconde Guerre Mondiale et les années d'après-guerre. Comme la zone se développait et que la terre gagnait de la valeur, Marco et Sal LoBue, les petits-fils de Rancadore, ont déplacé la majeure partie de leur production au sud, vers Gilroy. En 1968, la famille LoBue était prête à abandonner la culture de figues de Barbarie, mais Andrew D'Arrigo arriva et racheta l'activité, incluant les vergers de production.

Quelques années plus tard, D'Arrigo changea le nom du produit de « prickly pear » (littéralement : « poire épi-

neuse ») - qu'il pensait repoussant - pour « cactus pear » (littéralement : « poire de cactus »). La main d'œuvre devenant rare, il arrêta la pratique traditionnelle qui consistait à emballer chaque fruit dans un papier de soie. Dans les années 1980, il déplaça ses plantations à la zone de Gonzales, au sud-est de Salinas.

Cette vallée fertile, avec son climat maritime constant, est plus connue comme le « bol à salade » d'été d'Amérique et il peut sembler curieux que des cactus, plus associés avec les déserts brûlants dans l'esprit collectif, puissent bien réussir ici. De plus, la saison principale pour la figue de Barbarie au Mexique est l'été, moment où le pays exporte une grande quantité de fruits bons marchés vers les Etats-Unis d'Amérique. Cependant, dans les climats plus frais du nord et avec l'aide de la vieille pratique sicilienne du *scozzolatura* (signifiant « retirer les baies »), consistant à supprimer les fleurs de la floraison de printemps, D'Arrigo récolte d'octobre à mars, obtenant de meilleurs prix quand il y a moins de compétition. Les Frères D'Arrigo ont récemment sélectionné quelques nouveaux cultivars, notamment grâce au travail de R. Bunch et P. Felker.

AFRIQUE

L'introduction du cactus en Afrique du Nord a été favorisée par l'expansion Espagnole durant le seizième et dix-septième siècle et aussi par le retour des Maures vers leur terre natale quand ils ont finalement été expulsés d'Espagne en 1610 (Diguët, 1928). Ils emmenèrent avec eux « l'arbre à figue Indien » avec ses fruits succulents et le plantèrent autour de leurs villages (Diguët, 1928).

Algérie

Historiquement, l'introduction du cactus en Algérie a été similaire à celle du Maroc et de la Tunisie. Aujourd'hui, les zones dédiées à la culture de l'*Opuntia* s'étendent sur plus de 30 000 ha dont 60% dans la municipalité de Sidi-Fredj (45 km au nord de Souk Ahras) et le reste à Ouled Mimoune, Taoura, Dréa et Ouilène (Huffpost Algérie, 2015). A l'origine, la zone a été étendue par le Haut-Commissariat pour le Développement de la Steppe, la Direction des Services Agricoles et la Conservation des Forêts pour contrôler la progression du désert (Belgacem, 2012).

Dans le nord, *O. ficus-indica* est utilisé comme clôture autour des maisons et des petites villes ; les clôtures de plantes sont aussi utilisées pour la production de fruits et, en saison sèche, comme source de fourrage. Les fruits sont récoltés dans des plantations naturelles et sont utilisés pour la consommation humaine ou vendus sur les marchés locaux. Dans le sud, les cladodes d'*Opuntia* émergent comme aliment pour les petits ruminants et les dromadaires.



Tout comme dans d'autres pays Africains, la culture suscite de l'intérêt en Algérie qui a aujourd'hui sa première unité de transformation de figues de Barbarie. L'installation - basée à Sidi-Fredj et couvrant 5000 m² - peut transformer environ 2 tonnes à l'heure. Ses principales fonctions sont le conditionnement des figues de Barbarie et la production d'huiles essentielles, de produits pharmaceutiques, de jus, de confitures et d'aliments du bétail. L'usine de transformation représente un moyen important pour améliorer les revenus des habitants de la wilaya de Souk Ahras (Agence Ecofin, 2015).

Ethiopie

A la frontière avec l'Erythrée, la figue de Barbarie est cultivée dans la région Ethiopienne de Tigray et est localement nommée beles. La culture a un rôle économique et culturel important, reflété dans des chansons et proverbes traditionnels : « Oh mes beles vous m'épargnez cet été jusqu'à ce que l'orge soit joyeusement venue me sauver. » Plus de 85% de la population de Tigray tire ses moyens d'existence directement de l'agriculture. Etant donné l'augmentation incessante de la pression exercée par les humains et le bétail sur les terres, combiné avec un déclin de productivité des sols et des épisodes récurrents de sécheresse et famine, il y a une dépendance de plus en plus forte aux figuiers de Barbarie pour minimiser les risques et assurer les récoltes et la sécurité alimentaire. Le figuier de Barbarie a un rôle économique crucial : c'est une source de nourriture, d'aliment du bétail et de bois de chauffage ; dans certains cas, c'est une manière supplémentaire de générer des revenus, augmentant l'efficacité et la viabilité économique des petits producteurs. La région de Tigray couvre environ 80 000 km² et on estime qu'il y a environ 360 000 ha de figuiers de Barbarie dont deux tiers sont épineux. Approximativement la moitié de la surface existante d'opuntias a été plantée ; le reste a été envahi par des cactus naturalisés. Divers projets ont été développés pour sensibiliser les communautés locales aux usages du cactus ; cependant l'introduction de *Dactylopius coccus* a créé de sérieux problèmes quand il est devenu agressif envers les souches sauvages. Le figuier de Barbarie est principalement utilisé pour la production de fruits, bien que ce ne soit pas de manière intensive ni rationalisée. Les projets de coopération de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) dans la région, menés par des membres du Réseau International du Fiquier de Barbarie (CactusNet), ont conduit à l'augmentation de l'utilisation des *nopalitos*.

Maroc

Au Maroc, le cactus a été introduit en 1770 et est aujourd'hui bien représenté à travers le paysage national. En conséquence de la sécheresse, la surface de cactus a significativement évolué au cours des deux dernières décennies : de 50 000 ha en 1998 à plus de 120 000

ha aujourd'hui. La région de Guelmim-Sidi Ifni représente plus de 50% (>50 000 ha) de la surface nationale, suivie par Haouz-El Kelaa des Sraghna avec 30% (environ 30 000 ha). Khouribga est en troisième position, Doukkala en quatrième. Cette évolution de la surface de cactus durant les deux dernières décennies est le résultat de nombreuses opérations de plantation menées par des fermiers en collaboration avec des agences de développement et des organismes de conseil au sein de programmes nationaux de contrôle de la sécheresse (Arba, 2009a). Actuellement la modernisation de l'agriculture marocaine (Plan Maroc Vert) encourage la plantation de cactus comme culture alternative dans les régions moins favorables. Chaque année, plus de 4 000 ha sont plantés dans le centre et le sud du pays (Ait Hamou, 2007). Au cours des 10 dernières années, plusieurs entreprises et coopératives de femmes rurales ont été créées pour la transformation de cactus. Les produits principaux sont : la confiture, le vinaigre, le fourrage, la farine et l'huile de graines. Cependant l'intérêt principal réside dans son rôle de source de fourrage pour le bétail durant les fréquentes années sèches (M. Ochoa, communication personnelle).

L'avancée de la cochenille (*Dactylopius opuntiae*) constitue une menace récente pour les cactus du Maroc et de tout le bassin méditerranéen. L'origine de l'infestation est difficile à établir, mais elle est probablement venue d'Espagne où elle a été observée dans les régions de Murcie en 2006 et d'Almeria en 2013. La cochenille est aujourd'hui présente à Sidi Bennour, Rhamna et Youssoufia ; si rien n'est fait, elle va proliférer, détruire les plantations marocaines et migrer vers l'Algérie et la Tunisie. Les autorités ont mené des interventions d'urgence, déracinant et incinérant toutes les plantations de cactus sur plus de 400 ha à Sidi Bennour dans le Doukkala (Abdelouahed Kidiss, 2016). Une stratégie de contrôle a été mise en place en collaboration avec le Centre International de Recherche Agricole dans les Zones Arides (ICARDA).

Afrique du Sud

Le figuier de Barbarie, *Opuntia ficus-indica*, a été introduit au Cap il y a bien plus de 300 ans. La plante était apportée par des colons dans toutes les zones arides et semi-arides du sous-continent où il était cultivé comme clôture vivante et pour ses fruits délicieux. La plante est graduellement revenue à sa forme épineuse en une période d'environ 150 ans, contribuant significativement à ses capacités invasives et engendrant de denses et impénétrables fourrés dans certaines régions, principalement dans le Cap Oriental (Beinart et Wotshela, 2011). Les cactus ont envahi plus de 2 millions d'hectares au début du vingtième siècle en Afrique de Sud, avec de sérieuses conséquences pour l'agriculture, malgré ses utilisations comme fruit et fourrage. Dans les parties plus fraîches du pays, le cactus était moins agressif et les fermiers l'ont beaucoup adopté (Walters *et al.*, 2011). Pour répondre au problème des



invasions incontrôlables des figuiers de Barbarie, l'Afrique du Sud s'appuie sur le contrôle biologique. Environ 80% des infestations ont été contrôlées grâce aux dommages causés par deux insectes d'origine américaine se nourrissant de cactus : la mouche du cactus, *Cactoblastis cactorum* et la cochenille, *Dactylopius opuntia* (Zimmermann *et al.*, 2009). On estime que 1 500 ha sont cultivés pour les fruits et que 3 000 autres ha le sont exclusivement pour le fourrage. Il est estimé que 150 000 ha de l'infestation originelle du figuier de Barbarie sont actuellement utilisés extensivement, principalement pour leurs fruits qui sont vendus sur les marchés informels.

Des banques de germoplasmes ont été établies dans les provinces de Limpopo, l'Etat-Libre, du Cap Oriental et Occidental, avec 42 variétés ou types d'*O. ficus-indica* à des fins de recherche. A l'origine, la recherche se concentrait considérablement sur l'utilisation de cactus comme fourrage de sécheresse (Menezes *et al.*, 2010). Cependant, l'intérêt a récemment changé vers la production intensive de cactus pour l'alimentation du bétail et la consommation humaine.

Tunisie

Débutant en 1920-1930, la culture pour la production de fourrage s'est progressivement établie en Tunisie, basée principalement sur *Opuntia ficus-indica* f. *inermis*. Par exemple, avant l'expansion de l'irrigation en agriculture dans les années 1950 et 1960, la production laitière autour de Tunis et d'autres villes d'Afrique du Nord utilisait le cactus comme fourrage vert (particulièrement en été et automne) en complément du foin, de la paille et des céréales. Les plantations de fourrage étaient systématiquement développées suivant l'expertise fournie par Griffith au gouvernement de Tunisie en 1932 (Le Houérou, 2002). Au début des années 1930, sous l'attribution coloniale des terres à Sidi Bouzid (au centre de la Tunisie), où les précipitations moyennes sont de 250 mm, la possession de la terre était seulement concédée par le gouvernement à la condition que le bénéficiaire contractant, *inter alia*, plante 10% de la surface allouée en cactus sans épines comme réserve de fourrage d'urgence. Ce fut une très sage décision considérant les fréquentes sécheresses subies par les fermiers (Le Houérou, 1965). Avec le soutien des organisations internationales (le Programme Alimentaire Mondial [PAM] et la FAO), une grande surface (70 000 ha) dans la Tunisie aride a été plantée avec des cactus dans les années 1960 et 1970 pour servir de réserve de fourrage (Le Houérou, 2002). En parallèle, le gouvernement Tunisien fournissait du soutien, basé sur des aides de l'état et des prêts bancaires facilités, pour accélérer la plantation de cactus. De plus, en 1990, le pays lança un plan national pour l'amélioration des pâturages ; 142 000 ha de cactus ont été plantés durant cette période (OEP, 2016).

Actuellement, la surface couverte par les cactus est d'environ 600 000 ha sous différentes formes : des haies défensives, des bosquets entourant les maisons rurales, de consolidation des structures de contrôle de l'érosion, de la production extensive de fruits et, plus récemment, de la production intensive de fruits dans les agroclimats favorables. La plupart de ces plantations sont localisées dans les zones arides avec moins de 300 mm de précipitations et on y produit fourrage et fruits. Au cours de la dernière décennie, dans les vergers intensifs de cactus où tous les intrants nécessaires sont appliqués, la pratique du *scozzolatura* a été adoptée pour produire des fruits pour le marché local et l'exportation. En hiver, le prix des fruits de cactus atteint le double de celui des pommes, poires ou bananes. La Tunisie utilise les variétés Siciliennes ('Rossa', 'Gialla' et 'Bianca') ; en effet, ce sont les agriculteurs italiens qui ont introduit la *scozzolatura* au début des années 1990. Ces dernières années, l'agro-industrie de la transformation du figuier de Barbarie s'est étendue. Plusieurs entreprises, comme « Nopal Tunisia », se sont spécialisées dans la production et l'exportation de figues de Barbarie biologiques, de cosmétiques (huiles de graines, savons et shampoings), d'aliments (confiture, pulpe congelée et jus) et de farine séchée faite de raquettes de cactus.



ASIE OCCIDENTALE

Dans la plupart des pays d'Asie Occidentale, le cactus est installé depuis longtemps, principalement pour la production de fruits et comme haies autour des maisons. Au cours des dernières années, il y a eu un intérêt croissant pour la plante, mais comme culture secondaire plantée dans les terres marginales et seulement pour la production de fruits. Cependant, étant donné le peu d'intrants requis et le haut niveau d'adaptation aux environnements difficiles, les gouvernements et fermiers sont de plus en plus intéressés au cactus comme une culture à forte efficacité d'utilisation d'eau, pour améliorer la consommation locale de fruits. Néanmoins, malgré la pénurie sévère d'aliment pour le bétail et les effets négatifs du changement climatique dans ces pays, le cactus n'est toujours pas reconnu comme une bonne source de fourrage, capable de contribuer significativement à la réduction du manque de fourrage. Par ailleurs, le cactus a récemment été promu en Syrie pour la production de fourrage et on y a observé une forte adoption par les agriculteurs.

Jordanie

En Jordanie, les plantations de cactus épineux ont commencé il y a 60 ans comme haies autour des maisons et comme vergers. Le cactus sans épines a été introduit plus tard et a beaucoup été planté en monoculture

dans les zones semi-arides du centre de la Jordanie. En général, en plus des cactus Khadri locaux avec et sans épines, la plupart des cultivars sont importés en Jordanie. La surface actuelle de cactus est d'environ 300 ha, incluant les systèmes de production extensifs, les haies et les plantations mixtes (Nasr, 2015). Les systèmes de production extensif sont situés principalement à Madaba, où les fermiers cultivent les cactus en rangs pour la production de fruits, en y appliquant de l'irrigation complémentaire. Le cactus est aussi cultivé en plantations mixtes, associé avec d'autres arbres fruitiers, tels l'olivier et le figuier ; cependant, dû aux effets négatifs des épines de cactus sur les fruits, ce système disparaît peu à peu. Dans les zones hautes et caillouteuses de Jordanie, des cactus épineux sont encore plantés, alors que les variétés sans épines ne peuvent pas survivre dans ces environnements (Nasr, 2015). Étant donné la sévère pénurie de fourrage, plus d'efforts sont requis pour sensibiliser à l'utilisation du cactus comme fourrage.

Liban

Au Liban, le figuier de Barbarie a été introduit il y a longtemps dans les zones intérieures et côtières à des altitudes allant de 0 à 900 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le figuier de Barbarie est principalement destiné à la production de fruits mais est aussi cultivé comme clôture naturelle dans les productions « d'arak » (un alcool d'anis distillé et non sucré). Les plantations de cactus sont communes en systèmes de plantations mixtes, poussant avec d'autres arbres fruitiers, ainsi que dans les jardins familiaux pour l'autoconsommation. Les systèmes extensifs de production commerciale de fruits existent sur une surface très limitée dans le nord et le sud du Liban (Chalk, *et al.*, 2012). Les variétés de figuiers de Barbarie cultivés au Liban sont 'Baldi' (un cactus à épines) et des cultivars importés d'Europe, du Brésil etc. Les cultivars importés sont avec ou sans épines (Chalak *et al.*, 2012).

Syrie

En Syrie, comme en Jordanie et au Liban, le figuier de Barbarie est cultivé depuis longtemps, il est planté extensivement dans les zones rurales de Damas, principalement pour la production de fruits. Plus tard, et suite à des projets de recherche, plusieurs variétés ont été introduites en Syrie depuis les pays d'Afrique du Nord. Cependant, ces nouvelles acquisitions ont été gardées dans des pépinières de recherche sans être disséminées dans les fermes pour deux raisons principales : Premièrement, il y avait un manque de sensibilisation à l'importance de cette culture ; deuxièmement, le Ministère de l'Agriculture était concentré sur l'amélioration et la sélection de l'orge comme principale source d'aliment du bétail. Ces deux dernières années, avec la crise Syrienne et la pénurie de fourrage, l'intérêt dans la culture de cactus s'est accru dans les zones

relativement stables du pays comme Swidaa, Homs et les zones côtières. Des variétés envoyées par l'ICARDA ont été plantées comme plantes mères dans deux stations de recherches dans la zone côtière et dans la zone rurale de Damas ; les nouvelles raquettes sont maintenant en train d'être distribuées aux fermiers. Un projet récent pour le « développement du bétail », financé par le Fond International de Développement Agricole (FIDA), a planté 100 ha pour la production de fourrage et de fruits. Les résultats sont très prometteurs, avec une très forte demande de raquettes et un bon niveau d'adoption.

Les pays du Golfe et le Yémen

Dans le cadre de son programme régional de la péninsule Arabique, l'ICARDA a introduit 38 acquisitions de cactus depuis la Tunisie en 2005 et a établi une pépinière en Oman. Les raquettes de ces acquisitions ont ensuite été introduites dans les stations de recherche des pays du Golf et au Yémen. Des études des performances de production et d'adaptation aux conditions agroécologiques de la Péninsule Arabique ont été conduites en Oman, au Qatar, en Arabie Saoudite, aux Emirats Arabes Unis et au Yémen. Depuis 2012, la dissémination est en cours. En 2016, 47 fermiers au total ont adopté les cactus sans épines : 15 au Qatar, 10 en Oman, 9 au Yémen, 7 en Arabie Saoudite et 6 aux Emirats Arabes Unis.

Israël

En Israël, *O. ficus-indica* a fait l'objet de plusieurs projets, incluant des recherches pour déclencher la floraison et la maturation en été, automne et hiver. Aujourd'hui, le fruit est vendu presque toute l'année et à prix fort hors saison (Y. Mizrahi, communication personnelle). 'Ofer' est cultivé sur 350 ha dans les vallées de Negev et d'Arava, proche de la frontière Egyptienne dans le sud et près de la Jordanie à l'est. Dans ces régions, les fruits mûrissent entre fin juin et fin août. L'adoption de techniques de culture appropriées engendre une seconde floraison, avec une maturation des fruits entre décembre et avril. Il y a aussi une production limitée de fleurs séchées récoltées après la pollinisation et vendues comme remède naturel à la croissance non maligne de la prostate (Jonas *et al.*, 1998).

AUSTRALIE

L'Australie a une longue et intéressante histoire liée à l'utilisation commerciale d'*Opuntia*, qui fut introduit pour la première fois au début des années 1840, pour la production de cochenilles et pour clôturer. Des cochenilles ont été importées mais elles n'ont pas prospéré à cause de l'abondance d'oiseaux et d'insectes ravageurs ; la jeune industrie de la cochenille échoua. Cependant, *Opuntia* a prospéré grâce au climat adapté et l'absence des ravageurs naturels d'*Opuntia* et d'herbivores



le consommant. Dès 1925, les espèces introduites s'étaient naturalisées et couvraient 24 millions d'hectares. Des ennemis naturels ont été introduits et ont éradiqué avec succès les populations sauvages.

L'industrie moderne du figuier de Barbarie en Australie est vraiment petite avec moins de 200 ha actuellement cultivés sur le continent entier. La majeure partie de la production et de la diversité variétale se trouve dans les jardins des Australiens ayant un héritage Méditerranéen (S. Prowse, communication personnelle).

EUROPE

Italie

L'Italie, en particulier la Sicile, représente un exemple atypique de la reconnaissance d'*Opuntia ficus-indica*. Le figuier de Barbarie y a été exploité depuis le dix-huitième siècle, quand ses multiples usages incluaient les clôtures dans les systèmes agricoles et le fourrage d'urgence. Il était connu comme le « pain pour les pauvres » (Barbera *et al.*, 1991).

Sur la côte et près des villes principales, la production de fruits était exportée vers le continent. Ce succès économique a été renforcé par la technique de la *scozzolatura*, développée par les italiens pour être capable de récolter en automne, produisant des fruits de meilleure qualité qu'en récolte normale d'août. En 1975, des plantations modernes ont été établies pour l'industrie du fruit. La production de figues de Barbaries prospère dans les environnements qui sont trop pauvres pour d'autres cultures.

En Italie, la culture du figuier de Barbarie est concentrée en Sicile, qui compte pour 90% de la production totale (3 500 ha de zones spécialisées, 15 000 ha au total). Il y a quatre régions importantes : San Cono, le Mont Etna, Roccapalumba et Santa Margherita Belice ; les précipitations y sont de 600 mm par an. Les variétés, 'Gialla', 'Rossa' et 'Bianca' sont cultivées ; les fruits d'été comptent pour 10% de la production et la récolte d'hiver (août-novembre) correspond aux 90% restant. Avec l'irrigation, les rendements peuvent atteindre 25 tonnes par hectare (Basile, 1990).

Portugal

Au Portugal, le secteur privé a récemment commencé à mettre en place des plantations commerciales de figuier de Barbarie pour la production de fruits dans les zones semi-arides d'Alentejo et Algarve. Plus de 200 ha ont été plantés et 500 ha supplémentaires vont être plantés dans les prochaines années, grâce aussi à un programme d'aide aux personnes sans emploi qui veulent travailler en agriculture (Gonçalves, communication personnelle).

Espagne

En Espagne - Andalousie, Murcie, Almeria et les îles Baléares - le figuier de Barbarie se trouve seulement dans des plantations familiales. Lanzarote (Iles Canaries) a une petite production de pigment rouge.

PERSPECTIVES

« Or vert », « fruit pour les pauvres », « trésor sous ses épines », « dromadaire du monde végétal », « plante futur », « plante sacrée » et « arbre monstre » sont juste quelques-uns des épithètes utilisés pour la plante et le fruit (Arias Jiménez, 2013a). Ces noms témoignent de l'importance des opuntias dans le travail et la vie des gens, due à leur résistance à la sécheresse et aux hautes températures et à leur adaptabilité aux sols pauvres. Pourtant, il y a encore beaucoup de possibilités pour **son développement et son amélioration** :

- **L'effet de serre.** L'augmentation de la concentration de CO₂ et d'autres gaz dans l'atmosphère va mener à une plus grande distribution des espèces et à l'accroissement de la productivité surpassant tous les niveaux précédant (Nobel et García de Cortázar, 1991). De plus, l'augmentation des plantations de figuiers de Barbarie pourrait faire partie de la stratégie pour réduire l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère. Les plantations de figuiers de Barbarie peuvent fonctionner non seulement comme réserve d'eau mais aussi comme réservoir de carbone dans les régions arides et semi-arides, où le climat est plus irrégulier. Plus de recherche est nécessaire.
- **Diversité végétale.** Basé sur la compréhension actuelle de l'évolution des opuntias, davantage de recherches sont nécessaires pour aborder les questions de la délimitation des genres et des identités des espèces. L'intégration de données moléculaires, morphologiques et biogéographiques va générer une image plus claire des relations entre les genres et produire une source d'information biologique sur la diversité de cette exceptionnelle famille de plantes plus fiable et stable (Chessa, 2010).
- **Marketing.** Depuis le seizième siècle, les opuntias - principalement *Opuntia ficus-indica* - ont été utilisés dans les jardins de subsistance de nombreuses communautés d'Afrique, d'Asie, d'Europe et d'Amérique. Cependant, la consommation de fruits reste limitée aux marchés locaux et il y a peu d'exportation. La figue de Barbarie bénéficie de bonnes stratégies de marketing seulement en Italie, au Mexique, aux Etats-Unis d'Amérique et en Afrique du Sud (Inglese *et al.*, 2002a). Le marketing et les campagnes de promotion sont donc nécessaires, autant que des stratégies d'éducation des consommateurs à l'échelle locale et internationale (Caplan, 1990).

- **Qualité du fruit.** Comment encourager les gens à consommer de la figue de Barbarie ? Malgré les efforts des 20 dernières années, les connaissances actuelles restent rares et seulement une partie limitée de l'information scientifique est disponible pour les agriculteurs (Inglese et al., 2002a). Il est essentiel de mettre fin à la croyance populaire que le figuier de Barbarie nécessite peu d'intrants pour de bonnes performances. Cette idée fausse a mené à une mauvaise gestion des plantations de figuiers de Barbarie et à une faible qualité des fruits. L'expérience italienne a montré qu'une gestion rationnelle du verger donne de meilleurs résultats et une meilleure qualité de fruits avec de faibles coûts de gestion. Pour améliorer la productivité et la qualité des fruits, il doit y avoir une plus grande connaissance de l'influence de l'environnement et de la gestion du verger sur la fertilité, la croissance du fruit et la maturation (Ochoa, 2003). Il est aussi important d'établir des standards de qualité du fruit et de mettre en œuvre une conception et une gestion du verger adaptées.
- **Glochides et graines : deux obstacles à la mise en marché à surmonter.** Les glochides sur la peau peuvent être efficacement enlevés après récolte et les consommateurs doivent être informés en conséquence. D'autre part, réduire la quantité de graines est un défi majeur : il n'y a pas eu d'avancées importantes au cours des dernières décennies, bien que certaines sélections des cultivars 'Bianca' et 'Ofer' (El Behi et al., 2015; Weiss et al., 1993a) soient disponibles ; la poursuite de la recherche est nécessaire.
- **Cladodes comme aliments.** Les *nopalitos* offrent de bonnes perspectives pour le futur, mais ils ne sont actuellement utilisés qu'au Mexique et plus d'efforts sont requis pour leur diffusion. Le CactusNet a introduit les

nopalitos dans des régimes et gastronomies régionaux et en Ethiopie le projet « Mums for Mums » promeut l'utilisation des *nopalitos*.

- **Multiple usages.** Il y a clairement un vaste potentiel pour les utilisations non-alimentaires du figuier de Barbarie, en exploitant ses propriétés bio-fonctionnelles, médicinales, nutraceutiques et cosmétiques. De nombreux produits ont été brevetés ces dernières années (<http://www.bionap.com/it>).
- **Fourrage.** L'exploitation d'*Opuntia* pour le fourrage doit répondre aux besoins économiques de chaque pays et les technologies doivent s'adapter aux besoins du bétail ; le Brésil est un exemple clair du progrès en la matière.

L'héritage de Park S. Nobel sur la biologie environnementale des opuntias, combiné avec la coopération et l'assistance technique du Réseau International du Fiquier de Barbarie FAO-ICARDA (CactusNet - créé en 1993), ont ouvert la voie pour la compréhension actuelle du potentiel de ces espèces et leurs futurs rôles dans les zones semi-arides marginales. Les 25 dernières années ont vu : la publication de livres techniques et scientifiques, de brochures, d'actes et de comptes-rendus ; l'organisation de symposiums de la Société Internationale pour les Sciences Horticoles (SISH), des congrès et séminaires régionaux ; et la mise en œuvre de projets, grâce aux efforts du Réseau, de ses coordinateurs et des membres de la FAO et de l'ICARDA. Il est vital de continuer à avancer vers ces objectifs clairs, au profit des régions les plus pauvres du monde. Le figuier de Barbarie est le « Dromadaire du monde végétal » et l'un des plus précieux héritages légués au monde par les populations autochtones d'Amérique il y a plus de cinq siècles.



Origine et taxonomie d'*Opuntia ficus-indica*

Roberto Kiesling^a et Detlev Metzger^b

^a Institut Argentin de Recherche des Zones Arides, Conseil National de la Recherche Scientifique et Technique, Mendoza, Argentine

^b Groupe de Conservation de la Nature et de Sciences Végétales, Institut pour la Biologie et les Sciences Environnementales, Université d'Oldenburg, Allemagne



Origine et taxonomie d'*Opuntia ficus-indica*

INTRODUCTION

Opuntia ficus-indica est l'espèce de cactus ayant la plus grande importance agronomique, due à ses fruits délicieux, mais aussi à ses tiges, utilisées comme fourrage pour le bétail ou comme légume pour la consommation humaine (Alkämper, 1984 ; Kiesling, 1999a ; Casas et Barbera, 2002). L'utilisation et la culture des opuntias datent des temps préhistoriques bien avant que les Espagnols arrivent aux Amériques. Les chroniqueurs indiens ont été les premiers à laisser une trace de ces plantes et de leurs fruits qui ont été transportés vers l'Espagne et utilisés au début comme plantes ornementales (Casas et Barbera, 2002). Il est probable que les opuntias aient été ramenés après la première ou la seconde visite de Colomb aux Caraïbes, bien que la première archive soit du Mexique en 1515 (dans les chroniques de Fernández de Oviedo, reproduites par López Piñero *et al.*, 1992). La longue histoire de l'utilisation, de la culture et de la domestication d'*O. ficus-indica* et des espèces apparentées ont entraîné des problèmes taxonomiques et nomenclaturaux résumés dans ce chapitre.

ORIGINE ET TAXONOMIE D'*OPUNTIA FICUS-INDICA*

La forme inerme d'*O. ficus-indica* - commune aujourd'hui en agriculture - est le résultat d'un long processus de sélection en culture et est absente des populations sauvages. Selon Bravo Hollis et Sánchez Mejorada (1991), sa domestication a commencé il y a environ 8 000 ans. Reyes Agüero *et al.* (2005) soutiennent que sa domestication a eu lieu dans le sud des régions montagneuses méridionales du Mexique. Des références archéologiques indiquent que les opuntias utilisés il y a 8 000 ans ne peuvent pas être directement associés à l'*O. ficus-indica*. Callen (1965) a étudié les habitudes alimentaires précolombiennes des Indiens du Mexique et a trouvé des restes d'épiderme d'*Opuntia* dans des coprolithes sur le sol de cavernes, indiquant que la consommation d'*Opuntia* remonte à des milliers d'années, depuis au moins 5200 AEC. Selon Casas et Barbera (2002), des restes d'*Opuntias* ont été trouvés dans des ca-

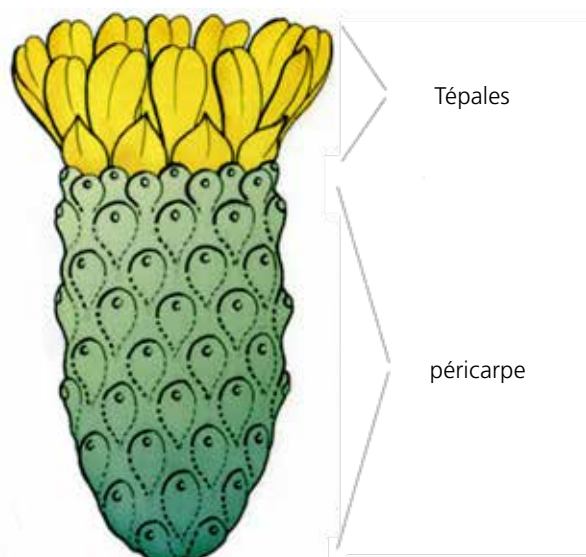
vernes de la phase Ajuereado (14000-8000 AEC).

Plusieurs taxons sont mentionnés comme ancêtres putatifs d'*O. ficus-indica*, en particulier, *O. megacantha* et *O. streptacantha*. Ces derniers, ainsi que plusieurs autres taxons et noms, sont souvent confondus à cause leurs descriptions ambiguës et à un manque d'individus de référence (Leuenberger, 1988).

Griffiths (1914) considérait *O. megacantha* comme la forme épineuse sauvage de l'*O. ficus-indica* cultivé (au sens strict, ou *O. ficus-indica* f. *ficus-indica*) ; cela a été corroboré plus tard par des études moléculaires (Griffith, 2004). Cependant, l'explication la plus probable est qu'ils aient un ancêtre commun. Tous deux résultent d'hybridations naturelles et de nombreux croisements sporadiques. Benson (1982) considère *O. megacantha* comme un taxon cultivé et un synonyme de *O. ficus-indica* sous sa « forme épineuse » et rejette les catégories de variété ou forme. D'autres auteurs (par exemple Gibson et Nobel, 1986 ; Brutsch et Zimmermann, 1993) suivent ce raisonnement. Selon Kiesling (1999a), *O. megacantha* est une réversion d'un *O. ficus-indica* inerme vers une plante épineuse (voir ci-dessous).

Un des rares auteurs à mentionner *O. ficus-indica* seulement sous sa forme inerme est Bravo Hollis (1978), qui utilise seulement les caractères morphologiques pour la délimitation ; cependant, elle

Figure 1
Une caractéristique typique de la fleur d'*Opuntia ficus-indica* est le long péricarpe qui est habituellement le double de la longueur des tépales.



se contredit plus d'une fois (1978 : 288, 322). Dans le même livre, elle liste six *variedades hortícolas* (qui correspondent au concept de cultivar) uniquement basées sur les caractères des fruits. Scheinvar (1995) accepte trois espèces distinctes : *O. ficus-indica*, *O. streptacantha* et *O. amyclaea*, mais considère aussi *O. ficus-indica* comme une forme cultivée ayant pour origine *O. streptacantha* et la garde séparée à un rang spécifique pour des raisons pratiques (L. Scheinvar, communication personnelle).

Plusieurs noms des séries *Streptacanthae* et *Ficus-indicae* (Britton et Rose, 1919) correspondent à des variations morphologiques mineures d'*O. megacantha*. Une description par Britton et Rose (1919) de la série *Ficus-indicae*, qui inclue les formes plus ou moins inermes du groupe discuté ici, a dit : « Aucune des espèces n'est définitivement connue dans son état sauvage, mais toutes ont probablement pour origine des ancêtres tropicaux, et ils peuvent tous représenter des races de plantes ici incluses dans notre série *Streptacanthae*. »

D'autre part, d'autres maintiennent qu'il y a suffisamment de différences pour garder les séries *Streptacanthae* et *Ficus-indicae* séparées. Colunga Garcia *et al.* (1986) ont écrit : « Donc, ces deux groupes peuvent être différenciés sur la base de la taille du cladode et la longueur de l'aréole, la longueur du fruit et de la graine, ainsi que sur la base de la longueur et le poids de la pulpe du fruit (la portion comestible du fruit). Notre opinion est que la taille du cladode, le poids de la pulpe du fruit, et aussi la forme de l'aréole peuvent différer à cause du processus de sélection qui a pour but d'améliorer la qualité pour l'utilisation comme fourrage pour les animaux ou pour la consommation humaine. »

Les épines - présence et taille - représentent un autre caractère très variable. Bien que le développement de formes inermes ait été encouragé pendant le processus de domestication, l'opposé - des inermes aux épineuses - est aussi possible. De telles réversions, où quelques branches de formes inermes produisent des épines après une sécheresse ou une autre forme de stress, sont mentionnées par plusieurs auteurs (Griffiths, 1912, 1914 ; Le Houérou, 1996a ; Kiesling, 1999a). De plus, quand des graines de formes inermes sont semées, un faible pourcentage des plantules développe des épines ; et vice-versa, des semis de graines de plantes à épines résultent en une petite proportion de plantes inermes (Berger, 1905 ; M. Ochoa, communication personnelle ; I. Chessa, communication personnelle ; expérience des auteurs). Le retour de cultivars inermes à des plantes épineuses a aussi été observé en Afrique du Sud et en Sicile (Zimmermann, 2011 ; Leuenberger et Arroyo Leuenberger, 2014). La présence d'épines n'est pas un caractère valable dans la taxonomie d'*Opuntia* car la formation d'épines n'est pas indépendante de facteurs environnementaux (Labra *et al.*, 2003).

NOMBRE DE CHROMOSOMES

La détermination du nombre de chromosomes et du niveau de ploïdie est un outil utile en taxonomie des plantes. Le nombre basique de chromosomes dans la famille des cactus est $n = 11$, et le nombre dans les cellules somatiques est principalement $2n = 22$. Dans la sous-famille des Opuntioideae, 64.3% des taxons sont polyploïdes (Pinkava *et al.*, 1985). Plusieurs études de caryotype montrent des tetra-, hexa- ou octoploïdes dans les relations putatives d'*O. ficus-indica* (*O. megacantha* en forme épineuse) $n = 44$ (Pinkava *et al.*, 1973) ; *O. streptacantha* $n = 44$ (Pinkava et Parfitt, 1982) ; *O. streptacantha* $2n = 88$ (Palomino et Heras, 2001) ; *O. amyclaea* et *O. megacantha* $2n = 88$ (Sosa et Acosta, 1966) ; *O. polyacantha* $2n = 44, 66$ (Stockwell, 1935). Des octoploïdes ($2n = 88$) sont aussi reportés pour d'autres taxons de la série *Streptacanthae* (incluant la série *Ficus-indicae*) (Segura *et al.*, 2007 ; Majure *et al.*, 2012a). La polyploïdie est favorisée par l'hybridation. L'hybridation naturelle interspécifique dans le genre *Opuntia* a été démontrée par plusieurs études (par exemple Benson et Walkington, 1965 ; Grant et Grant, 1982 ; Griffith, 2003 ; McLeod, 1975) et l'hybridation en culture est aussi commune. L'occurrence de niveaux de ploïdies plus élevés de cultivars en comparaison à des parents sauvages est de toute évidence vraie pour *O. ficus-indica* cultivé (Mondragón Jacobo et Bordelon, 1996). Pour *O. ficus-indica* seul, plusieurs comptages de chromosomes montrent que les formes avec et sans épines sont toutes deux octoploïdes (Barbera et Ingleses, 1993). Cependant cette espèce est aussi rapportée comme étant hepta-, penta-, hexa- et diploïde, donc il existe une variation du nombre de chromosomes, dépendante de la provenance (Spencer, 1955 ; Weedin et Powell, 1978 ; Pinkava, 2002 ; Majure *et al.*, 2012a) - à moins que les nombres différents soient le résultat de matériel d'étude mal identifié ou d'anomalies dans la méiose. McLeod (1975) indique la présence de spécimens hybrides avec $2n = 77$, entre *O. ficus-indica megacantha* (octoploïde : $2n = 88$) et *O. phaeacantha* var. major Engelm. (hexaploïde : $2n = 66$). Carpio (1952) mentionne aussi $n = 44$ pour *O. ficus-indica*. Il suggère que les méioses anormales et l'existence de tétravalences montrent que *O. ficus-indica* est soit un allopolyploïde venant de deux espèces avec $2n = 44$ ou un autopolyploïde. L'allopolyploïdie de *O. ficus-indica* est confirmée par Griffith (2004).

ETUDES MOLECULAIRES

Etant donné que les études morphologiques ont conduit à différentes hypothèses taxonomiques, une plus grande précision était attendue des études molé-



culaires (principalement de l'ADN) concernant la variabilité, les relations et les origines des espèces d'*Opuntia* et d'*O. ficus-indica* en particulier. Bien que plusieurs études se soient principalement concentrées sur la diversité génétique des cultivars (par exemple Bendhifi *et al.*, 2013 ; El Finti *et al.*, 2013 ; Ganopoulos *et al.*, 2015), quelques-unes donnent un aperçu de la différenciation d'*O. ficus-indica*. Wang *et al.* (1999) ont étudié cinq cultivars de cactus à fruits du Mexique et du Chili, deux souches ornementales du Texas et une souche de consommation en légume du Mexique. L'analyse ADN a révélé des différences significatives entre les souches commerciales, mais seulement des petites différences entre les cultivars fruitiers (incluant les formes inermes et épineuses). La diversité des cactus cultivés semble être faible en général, probablement parce qu'ils tirent leur origine d'une base limitée de germoplasmes (Boyle et Anderson, 2002).

Dans une étude de Labra *et al.* (2003), les données moléculaires ont révélé une forte similarité génétique entre *O. ficus-indica* et *O. megacantha*. La seule différence (morphologique) entre les deux est la présence d'épines. Les auteurs concluent qu'*O. ficus-indica* devrait être considéré comme une forme domestiquée d'*O. megacantha*.

Griffith (2004), en étudiant l'origine d'*O. ficus-indica* à l'aide de données moléculaires, a trouvé un clade bien supporté incluant *O. ficus-indica*, *O. streptacantha*, *O. tomentosa*, *O. leucotricha* et *O. hyptiacantha*, tous du sud et du centre du Mexique (lieu de diversité d'*Opuntia* - Barthlott *et al.*, 2015). L'analyse soutient l'hypothèse que le lieu de domestication a été la région centrale du Mexique et que *O. ficus-indica* peut être polyphylétique, c'est-à-dire qu'il descend de plusieurs lignées. Cela pourrait être dû à l'hybridation (naturelle ou en culture), à la dérive de multiples clones uniques depuis diverses souches parentales, ou au classement en lignées de multiples copies d'espaces internes transcrits (EIT) dans une population ancestrale de laquelle *O. ficus-indica* et des espèces proches pourraient être originaires (Griffith, 2004). Caruso *et al.* (2010) ont étudié la diversité génétique des génotypes cultivés d'*O. ficus-indica*. Leur analyse soutient l'hypothèse que *O. Ficus-indica* consiste en un groupe de multiples clones non-apparentés, dérivés de différentes espèces parentes et sélectionnées pour différents traits agronomiques.

Majure *et al.* (2012b) ont conclu qu'*O. ficus-indica* est une des nombreuses espèces tirant leurs origines dans des événements d'allopolyploïdisation causés par l'hybridation d'espèces appartenant à différents clades. Les échantillons d'*O. ficus-indica* étudiés par Caruso *et al.* (2010) ne se sont pas groupés séparément d'autres espèces (*O. amyclaea*, *O. megacantha*, *O. streptacantha*, *O. fusciculis* et *O. albicarpa*), indiquant que la

position taxonomique actuelle et les motifs génétiques ne correspondaient pas très bien. Lyra *et al.*, (2013a) ont étudié les caractéristiques de cultivars de quatre espèces (*O. ficus-indica*, *O. albicarpa*, *O. streptacantha* et *O. robusta*), mais avec les marqueurs utilisés (EIT) il n'était pas possible d'assigner les échantillons de ces espèces à des clades différents. Cette difficulté peut venir du fait que les échantillons sont d'origine hybride ou ont une ascendance commune. Valadez Moctezuma *et al.* (2015) ont émis cette dernière supposition quand *O. ficus-indica*, *O. albicarpa* et *O. megacantha* se sont révélés impossibles à séparer dans des clades différents. De la même manière, Samah *et al.* (2015) n'ont pas pu détecter de limites claires entre *O. ficus-indica*, *O. albicarpa*, *O. megacantha*, *O. streptacantha*, *O. lasiacantha* et *O. hyptiacantha*. Astello Garcia *et al.* (2015), dans une étude sur la composition moléculaire de cinq espèces d'*Opuntia*, n'ont pas pu vérifier le gradient de domestication proposé pour *O. ficus-indica*, quand différents cultivars de ces espèces se sont regroupés au sein de différents groupes. Bien que l'étude ait échoué à identifier l'ancêtre, *O. hyptiacantha* a pu être apparenté à la majorité des échantillons étudiés d'*O. ficus-indica*. Srikanth et Wang (2015) ont comparés trois taxons d'*Opuntia* cultivés en Corée et ont trouvé que l'*O. ficus-indica* coréen est apparenté de près à *O. engelmannii* et *O. ellisiana*, mais pas aux échantillons d'*O. ficus-indica* prélevés dans la base de données de GenBank. Des études moléculaires révèlent les erreurs de la taxonomie actuelle des espèces et du complexe de cultivars d'*O. ficus-indica*, et interroge pour savoir si ces problèmes sont causés par l'hybridation, les réponses génétiques adaptatives, la plasticité phénotypique, les bases épigénétiques ou d'autres facteurs (Valadez Moctezuma *et al.*, 2014).

DISTRIBUTION ET NATURALISATION

Alors que ses ancêtres sont originaires du centre du Mexique (Griffith, 2004), *O. ficus-indica* a été emmené par l'homme vers d'autres zones du monde avec des climats chauds. Suite à l'introduction d'*O. ficus-indica* en Espagne vers 1500, l'espèce (et d'autres du même genre) se sont propagées et naturalisées à travers le bassin méditerranéen, devenant rapidement un élément caractéristique du paysage. Il était déjà très répandu en Europe en 1550 (Mottram, 2013). Par conséquent, il n'est pas surprenant qu'une espèce, *O. amyclaea*, ait été décrite en 1826 comme venant d'Italie, où elle a été trouvée près de la ville d'Amyclæ (aujourd'hui Monticelli). Elle correspond à la forme épineuse d'*O. ficus-indica*. *O. amyclaea* a été considéré par Schelle (1907) comme une forme d'*O. ficus-indica* ; pour cette raison, dans les rangs taxonomiques de forme, son nom précédent était *O. ficus-indica* f. *amyclaea*. Berger (1905, 1912b) a aussi



supposé que cet *Opuntia* établi en Italie devait être la forme originale d'*O. ficus-indica*, c'est-à-dire une forme ancestrale. Une forme d'*O. ficus-indica* d'Argentine a aussi été décrite comme une nouvelle espèce (*O. cordobensis*) et de la même manière une forme de Bolivie (*O. arcei*) (Kiesling, 2013). Au début du vingtième siècle, le botaniste et agronome américain David Griffiths a étudié et cultivé des opuntias au Texas pour des évaluations taxonomiques et agronomiques (Benson et Walkington, 1965 ; Walkington, 1968). Il a décrit plusieurs espèces de spécimens cultivés et quelques-unes de ces espèces - mieux traitées comme cultivars - sont considérées aujourd'hui comme synonymes ou hybrides d'*O. ficus-indica* (par exemple *O. fusciculis*, 1908 ; Kiesling et al., 2008). Au dix-huitième siècle, *O. ficus-indica* a été introduit sur d'autres continents par les navigateurs qui - étant donné son contenu en vitamine C et sa bonne capacité de conservation - l'utilisaient comme légume pour prévenir le scorbut (Diguët, 1928). Ils l'ont aussi transporté pour :

- Répondre à la demande de teinture carmin de cochenilles qui se nourrissent d'*Opuntia* ;
- L'utiliser comme fourrage ;
- L'incorporer dans l'alimentation humaine ;
- Faire des clôtures vivantes.

Adaptés aux conditions rudes et sèches, les opuntias pouvaient facilement s'échapper et se naturaliser dans les zones arides d'Afrique, d'Asie et d'Australie. *O. ficus-indica* avait déjà été introduit en Amérique du Sud par les conquérants Espagnols, par exemple, en Bolivie (Hoffmann, 1955). Les opuntias se sont rapidement répandus dans de nombreuses régions, devenant souvent invasifs : une menace pour la biodiversité autochtone, et pour l'utilisation agricole des terres (Brutsch et Zimmermann, 1993 ; Barbera et Inglese, 1993 : 11). Aujourd'hui *O. ficus-indica* est naturalisé dans 26 pays en dehors de son habitat d'origine (Novoa et al., 2014).

Dans tous les pays tropicaux arides où il est cultivé ou naturalisé, *O. ficus-indica* a subi des altérations génétiques et des modifications phénétiques, résultant en de nouvelles formes qui ont été distinguées ou formellement nommées. Parfois elles sont classifiées et nommées comme espèces ou variétés, même quand une classification et l'attribution d'un nom en tant que cultivar des deux formes (*O. ficus-indica* f. *amyclaea* et *O. ficus-indica* f. *ficus-indica*) serait plus appropriée (cf. Brickell et al., eds, 2009).

Bien qu'il y ait de nombreuses traces écrites sur l'introduction des *O. ficus-indica* f. *ficus-indica* inermes dans différents pays, il faut noter qu'il n'y a presque aucune référence concernant l'introduction de la forme épineuse.

NOMS VERNACULAIRES

Étant donné l'importance d'*O. ficus-indica* et ses nombreux avantages, on lui a attribué de nombreux noms dans son habitat d'origine et dans les régions où il a été introduit (Reyes Aguero et al., 2015). Certains de ces noms sont une bonne illustration de l'origine de l'introduction et de la distribution.

Le nom « tuna » est d'origine caribéenne (Bravo Hollis et Sánchez Mejorada, 1991) et a été utilisé par les premiers Espagnols arrivant aux Amériques. Pour être précis, c'est un nom Tain (Moringo, 1966). Il fait généralement référence aux fruits, mais est aussi utilisé pour les parties végétatives des espèces d'*Opuntia*. Ce nom est actuellement utilisé dans une très vaste aire, ce qui suggère qu'il a été le premier nom connu par les Espagnols, avant même les noms mexicains (puisqu'ils ont atteint les îles caribéennes avant le continent).

« Nopal » est un nom mexicain dérivé du Nahuatl *Nopalli* (Bravo Hollis et Sánchez Mejorada, 1991 ; Moringo, 1966) qui est utilisé pour plusieurs espèces. *Tenochtli* est le nom originel utilisé dans une grande partie du Mexique.

Le premier nom espagnol est *higo de las Indias*, une référence à ses origines, les Nouvelles Indes ; il a donné lieu au premier nom scientifique : *Cactus ficus-indica* Linné. L'épithète *ficus-indica* a été utilisé comme une « phrase diagnostique » bien avant Linné, pour désigner plusieurs espèces plus ou moins similaires. Dans d'autres langues, des noms vernaculaires similaires sont utilisés : *figo da India* (portugais) ; *Indian fig* (anglais) ; *figuier d'Inde* (français) ; *Indianische Feige* (allemand) ; *fico d'India* (italien) (Reynolds et Arias, 2001).

Un autre nom très connu est *tuna de Castilla* (ou nopal de Castilla), évidemment dérivé du nom de l'ancien royaume espagnol de Castille, d'où l'*Opuntia* a été distribué aux autres pays. Le Houérou (1996a) mentionne l'Andalousie comme le premier centre de propagation dans ce continent - la région où Christophe Colomb est retourné après ses voyages. Après la dissémination d'*Opuntia* en Espagne, il a été introduit en Afrique du Nord où il a été appelé *higo de los cristianos*. La forme épineuse est actuellement très répandue au Maroc où il est appelé *tapia* (du mot espagnol signifiant clôture), une référence à son utilisation comme haie (A. Prina, communication personnelle). Le nom « sabra » - un mot utilisé pour faire référence aux autochtones tout comme au figuier de Barbarie - illustre l'étendue de sa distribution dans le bassin méditerranéen. En effet, l'espèce est fréquemment utilisée pour illustrer des timbres postaux dans plusieurs pays autour de la mer Méditerranée.

En 1769, les missionnaires Franciscains ont emmené la forme cultivée du Mexique vers la Californie, où il est appelé *mission cactus* (Benson et Walkington, 1965 ; Walkington, 1968). Cependant, il n'est pas certains que



Figure 2
La spination, la morphologie du cladode et les caractéristiques du fruit ont été altérés par l'homme durant le long processus de sélection.

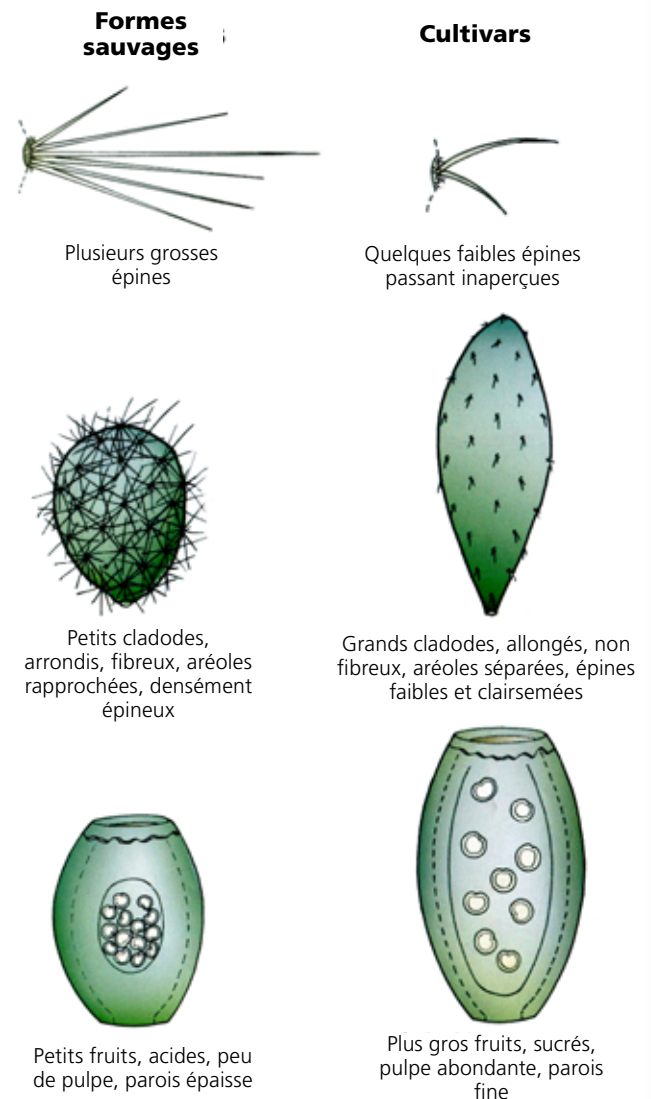
les autochtones ne cultivaient pas déjà cette espèce avant l'arrivée des Franciscains. Walkington (1968) a utilisé le *O. ficus-indica* dans le sens large.

L'espèce est très importante pour l'économie du nord-est du Brésil, où elle est principalement utilisée comme fourrage tout au long de l'année et est appelée *palma forrageira*. On ne sait pas quand elle a été introduite dans ce pays (Domingues, 1963). *Palma-de-gado* est un autre nom commun d'*O. ficus-indica* dans le nord-est du Brésil. Plusieurs autres noms vernaculaires commençant par « palma » sont utilisés pour cette espèce dans les régions de l'état brésilien de Bahia, où les cladodes sont utilisés comme fourrage et les fruits, le mucilage et les racines ont plusieurs usages dans la nutrition et la médecine humaine (Andrade, 2008).

LE ROLE DE LA COCHENILLE

Les cochenilles du genre *Dactylopius* parasitent beaucoup d'espèces de cactus, incluant celles du genre *Opuntia*. Les cochenilles ont une grande affinité spécifique. *Dactylopius coccus*, aussi connu comme grana, a une préférence absolue pour *O. ficus-indica* et pour les taxons qui sont considérés comme synonymes ou sont apparentés de près (par exemple *O. megacantha*, *O. streptacantha*, *O. cordobensis*). José de Acosta (1590, cité par Di Lullo, 1944) a écrit sur le sujet des tunaes domésticos dans le Haut et Bas Pérou (aujourd'hui, la Bolivie et le Pérou), et ses observations sont cohérentes avec les connaissances actuelles d'*O. ficus-indica* ; on peut donc déduire que ce cactus était probablement présent dans ces zones dès le début. Au Pérou, l'utilisation de *grana* date de la période préhispanique, probablement remontant au temps du Christ (Marín, 1991 ; Sáenz *et al.*, 2002a) ; cependant, il n'est pas clair s'il s'agissait de *D. coccus* ou d'une autre espèce de cochenille. Fester (1941) et Fester et Lexow (1943) ont mentionné une analyse spectrométrique des couleurs des tissus préhispaniques (Paracas, du Pérou) et de tissus du nord de l'Argentine, démontrant que le colorant rouge n'avait probablement pas pour origine *D. coccus* comme au Mexique et en Amérique Centrale, mais d'autres espèces de *Dactylopius*.

L'importance économique de la production de la cochenille au cours du dix-neuvième et vingtième siècles a mené à l'introduction de la plante hôte et du parasite dans plusieurs pays en dehors de leur aire de distribution d'origine. Selon Piña (1981), *D. coccus* a été introduit au Pérou au dix-neuvième siècle, avant que le pays ne commence à exporter du *grana* en 1830.



Pour l'Argentine, Lafone Quevedo (1927) a décrit la manière dont le *grana* était récolté du *quiscaloro* (nom vernaculaire pour les espèces sauvages *O. sulphurea* et *O. anacantha*, entre autres). Selon les entomologistes argentins Claps et de Haro (2001), cinq espèces sauvages de *Dactylopius* productrices de pigment rouge parasitent plusieurs espèces de cactus autochtones d'Argentine. Une sixième espèce est *D. coccus* qui se trouve sur les *O. ficus-indica* cultivés et naturalisés. Durant les années 1980, l'ancien président Menem a introduit *D. coccus* pour encourager la production de grana en Argentine. Bien que cette tentative de produire du *grana* n'ait pas été un succès, des *D. coccus* naturalisés ont été observés pour la première fois en 1999 dans La Rioja, en Argentine (De Haro et Claps, 1999). Plus tard, il y a eu aussi des observations dans la région de Salta (Van Dam *et al.*, 2015). Donc il est plausible que le colorant rouge extrait par le passé ait été obtenu

d'autres espèces de *Dactylopius*. Les mêmes chercheurs déclarent que bien que les cochenilles autochtones vivent sur différentes espèces de cactaceae, elles ne vivent ni sur *O. ficus-indica* ni sur *O. cordobensis* - une indication forte en faveur de son affinité spécifique. Selon Van Dam *et al.* (2015), *D. coccus* est une forme domestiquée, comme supposé pour la plante hôte *O. ficus-indica*.

Des archives connues, il peut être déduit que *D. coccus* n'était pas présent dans l'Amérique du Sud Andine avant l'arrivée des conquérants Espagnols.

VUE D'ENSEMBLE DE LA TAXONOMIE ET DE LA NOMENCLATURE

Les différentes entités considérées et libellées sous plusieurs noms scientifiques comme espèces correspondent à une seule entité biologique. Au sens le plus strict, *O. ficus-indica* n'est pas une espèce naturelle (Kiesling, 2013), mais plutôt un complexe de cultivars et clones naturalisés.

O. ficus-indica peut-être distingué d'autres espèces par plusieurs caractéristiques. Les réceptacles des fleurs et ultérieurement les fruits ont beaucoup d'aréoles (≥ 38), avec un très petit nombre de cultivars en ayant moins (Pinkava *et al.*, 1992 ; Kiesling, 1999a) ; les aréoles sont principalement situées sur des mamelons très notables. D'autres espèces d'*Opuntia* ont moins d'aréoles sur les fleurs et les fruits, situées sur des mamelons moins proéminents.

Le nom *Opuntia ficus-indica* a la priorité sur d'autres noms donnés à cette espèce (Kiesling, 1999b). Des types nomenclaturaux basés sur des spécimens d'herbiers, qui déterminent l'application des noms, n'ont pas été désignés avant 1991 pour *O. ficus-indica*, et avant 2010 pour *O. streptacantha* et *O. megacantha* (Leuenberger, 1991 ; Scheinvar *et al.*, 2010), bien que ces trois noms aient tous été publiés au dix-huitième ou dix-neuvième siècle et largement utilisés par la suite. Le spécimen choisi comme type nomenclatural (lectotype) d'*O. ficus-indica* (Leuenberger, 1991) correspond à une plante sans (ou avec de très petites) épines. Cependant, la présence/absence d'épines n'est pas un caractère utile pour distinguer *O. ficus-indica* d'autres espèces et les formes avec et sans épines doivent être considérées comme différents phénotypes d'une même espèce. Néanmoins, ce caractère est utilisé ici pour séparer formellement les plantes épineuses et inermes d'*O. ficus-indica* au sein de la forme de rang (le plus bas niveau des catégories taxonomiques), même si les deux formes peuvent venir l'une de l'autre.

***Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., Gard. Dict. ed. 8, Nr. 2; 1768**

Basionyme : *Cactus ficus-indica* L., Sp. pl. : 468. 1753.
Les plantes sont arbustives ou arborescentes, jusqu'à 6

m de hauteur, généralement avec des troncs bien développés. Les segments de tige sont variables, en général obovales ou oblongs à spatulés, aplatis, 20-50 cm de long, 20-30 cm de large, environ 2 cm d'épaisseur, vert mat, couvert par une très fine couche cireuse, aréoles séparées de 2-5 cm. Les glochides tombent précocement, les épines sont absentes ou 2 (-7) par aréole, 0.5-1.0 cm de long, blanchâtres. Les fleurs sont jaunes, rarement oranges, 6-8 cm de long et 5-10 cm de diamètre pendant l'anthèse. Le fruit a de nombreuses aréoles (approximativement 30-40), avec des glochides, rarement des épines, mamelonné, ovoïde à oblong, 6 (-8) cm de long, 3 (-5) cm de diamètre, jaune, orange, rose-vert ou rougeâtre.

Opuntia ficus-indica f. *ficus-indica*

Synonymes : *Opuntia ficus-indica* var. *gymnocarpa* (F.A.C. Weber) Speg., Anales Mus. Nac. Buenos Aires ser. 3, 4 : 512. 1905. *Opuntia ficus-indica* var. *decumana* (Haw.) Speg., Anales Mus. Nac. Buenos Aires ser. 3, 4 : 512. 1905. *Opuntia ficus-barbarica* A. Berger. Monatsschr. Kakteenk. 22 : 181. 1912. *Opuntia tuna-blanca* Speg. An. Soc. Cient. Arg. 99 : 107. 1925.

Aréoles sans épines ou avec seulement des petites et faibles épines.

Opuntia ficus-indica f. *amyclaea* (Ten.) Schelle, Handb. Kakteenkultur : 51. 1907

Basionyme : *Opuntia amyclaea* Ten., Fl. Neap. Prod. App. : 15. 1826.

Synonymes : *Opuntia ficus-indica* var. *amyclaea* (Ten.) A. Berger, Hort. Mortol. : 411. 1912. *Opuntia megacantha* Salm-Dyck, Hort. Dyck. : 363. 1834. *Opuntia streptacantha* Lem., Cact. Gen. Sp. Nov. 62. 1839. *Opuntia cordobensis* Speg., Anales Mus. Nac. Buenos Aires ser. 3, 4 : 513. 1905. *Opuntia arcei* Cárdenas, Cact. Succ. J. (Los Angeles) 28 : 113. 1956.

Aréoles avec des épines notables.

CONCLUSIONS

Basées sur les faits présentés et les connaissances biologiques, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- *O. ficus-indica* f. *ficus-indica* indica est le résultat d'un processus de sélection de longue durée pendant sa culture. Un des résultats de ce processus est le développement de polypléidie (jusqu'à octoploïde) et de formes ou cultivars plus vigoureux, plus commodes pour l'utilisation humaine que leurs parents sauvages. La sélection de plantes moins épineuses a mené à des formes libres d'épines. La taille et la qualité du fruit ont aussi influencé le processus de sélection qui avait commencé avant l'arrivée des Espagnols au Mexique.



L'hybridation intraspécifique autant qu'interspécifique suggère une origine polyphylétique.

- La forme inerme cultivée a été introduite en Espagne, probablement quelques années après la découverte de l'Amérique (vers 1500) et initialement utilisée comme plante ornementale et une curiosité dans les jardins de la noblesse. De là, il a été emporté vers d'autres pays dans le Bassin Méditerranéen tout comme vers l'Amérique du Sud, l'Afrique du Sud, l'Inde et l'Australie. Les navigateurs ont accru sa dispersion en l'embarquant comme légume frais de protection contre le scorbut. Les raisons principales à la poursuite de la dissémination d'*O. ficus-indica* par les humains étaient la production de fourrage dans les zones arides, l'utilisation des fruits ou des raquettes pour la consommation humaine et la production de cochenilles.
- Dans plusieurs pays avec un climat aride et chaud propice, l'espèce a été introduite et cultivée, se dif-

fusant par reproduction végétative et sexuée jusqu'à ce qu'elle se naturalise. Ce processus a eu lieu indépendamment et plus d'une fois dans plusieurs lieux, dans différents pays et sur tous les continents, aussi bien dans les aires de distribution autochtones que nouvelles. Cela a mené à de nouveaux centres de différenciation infraspécifique, avec l'émergence de cultivars et par la suite de clones et hybrides naturalisés. Comparées aux clones cultivés, les formes naturalisées ont développé des caractères morphologiques et physiologiques légèrement différents. Des formes épineuses ont émergé à maintes reprises de plantes inermes.

- *O. ficus-indica* est considéré comme une espèce ou un groupe de multiples clones non-apparentés dérivés de différentes espèces parentales. L'aire de distribution d'origine des taxons ancestraux est le Mexique central.



Morphologie et anatomie de *platyopuntiae**

Loreto Prat et Nicolás Franck - Université du Chili, Santiago du Chili, Chili

*Ce chapitre est basé sur un chapitre du livre *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear* (1995) de la FAO, préparé par Fusa Sudzuki (décédé)



INTRODUCTION

Les espèces d'*Opuntia*, en particulier celles du sous-genre *Platyopuntia*, ont développé des adaptations anatomiques, morphologiques et physiologiques pour croître et survivre dans des environnements arides où de sévères stress hydriques entravent la survie d'autres espèces de plantes (Beccaro *et al.*, 2015). Ce chapitre décrit quelques-unes des plus importantes adaptations morphologiques et anatomiques présentes dans les racines, les rameaux et les structures reproductives d'*Opuntia ficus-indica* (figuier de Barbarie) - l'espèce d'*Opuntia* ayant la plus grande valeur économique.



SYSTEME RACINAIRE

Les racines des Cactaceae reçoivent peu d'attention. Elles sont différentes de celles des autres plantes, puisqu'elles développent des caractéristiques xéromorphiques qui permettent à la plante de survivre à des périodes prolongées de sécheresse. Les racines peuvent **contribuer à la tolérance de la sécheresse** de différentes manières, via :

- La restriction de la surface racinaire et la diminution de leur perméabilité à l'eau - les radicelles sont couvertes d'une couche relativement imperméable à l'eau, ou les racines subissent une abscission laissant une cicatrice pour éviter la perte d'eau vers le sol sec.
- La rapide absorption des petites quantités d'eau fournies par les légères pluies - des « racines de pluie » se développent en l'espace de quelques heures après une averse et disparaissent dès que le sol sèche, ou bien il y a une réduction de la surface racinaire de laquelle l'eau s'échappe.
- La diminution de la transpiration des rameaux due au potentiel très négatif des racines.

Les caractéristiques ci-dessus signifient que ces économiseurs d'eau résistants à la sécheresse peuvent avoir une haute résistance hydraulique (Passioura, 1988) ; qui, à son tour, diminue le flux d'eau vers les rameaux.

Opuntia ficus-indica a un système racinaire superficiel et charnu, qui se répand horizontalement. La distribution racinaire peut dépendre du type de sol et de la gestion culturale (Snyman, 2005). Dans des conditions favorables de sol, une racine pivotante se développe, pénétrant presque 30 cm dans le sol. Dans des condi-

tions de sécheresse, telles que celles rencontrées dans les régions arides et semi-arides, des racines secondaires charnues se développent depuis la racine pivotante pour absorber l'humidité du sol à une plus grande profondeur. Néanmoins, dans tous les types de sols, la majeure partie de la masse de racines absorbantes se trouvent dans les centimètres superficiels, à une profondeur maximale de 30 cm, mais se répandant horizontalement sur 4 à 8 m. On a aussi observé que les plantes fertilisées périodiquement avec du fumier développent des racines succulentes non ramifiées, alors qu'elles développent normalement plus de racines latérales qui rapidement forment une couche d'écorce de surface lâche s'exfoliant (North and Nobel, 1992).

Selon Snyman (2004, 2005), le système racinaire d' *O. ficus-indica* est très complexe et peut présenter **quatre sortes de racines** :

- **Les racines charpentières** : formées depuis un système racinaire primaire composé de racines peu fibreuses, 20-30 cm de long, qui très tôt augmentent d'épaisseur par croissance secondaire pour former un périoderme. Quand le système racinaire est gardé sec durant un certain temps puis réhumidifié, des racines absorbantes sont formées à partir des bourgeons latents dans les quelques heures qui suivent, pour répondre rapidement à la venue d'humidité (North *et al.*, 1993 ; Dubrovsky *et al.*, 1998). L'initiation de racines latérales est toujours endogène aux cellules du parenchyme appartenant au phloème secondaire. La recherche sur la régularité de la formation des racines adventives d'*O. ficus-indica* a montré que les fines racines latérales de la racine pivotante disparaissent avec l'âge. Ce processus stimule la division cellulaire dans les tissus du parenchyme racinaire et la formation de points méristématiques avec des racines adventives (Gibson et Nobel, 1986). Cette fine et fragile masse racinaire est formée de courtes radicelles, ramifiées et complètement couvertes de poils racinaires. Aussi, différentes sortes d'ectomycorhizes, principalement du type vésiculaire-arbusculaire, croissent avec les radicelles courtes et ramifiées.
- **Les racines absorbantes** : formées en quelques heures puisque le bourgeon latéral répond rapidement à l'avènement d'humidité. Gibson et Nobel (1986) ont nommé ces racines absorbantes « racines de pluie ». Elles se développent depuis des bourgeons latents cachés dans le cortex de racines plus anciennes. Ces racines de pluie disparaissent dès que le sol sèche.

- **Les éperons racinaires** : développés en grappes sur la plus volumineuse masse de racines, (Boke, 1980). La base de l'éperon d'*O. ficus-indica* présente une couronne d'ajouts ressemblant à des bractées et, contrairement à la description de Boke, les racines développées sur l'éperon d'*O. ficus-indica* sont de deux classes : courtes, grossières et charnues, avec beaucoup de poils racinaires ; et deux ou trois racines fines et longues, similaires aux racines absorbantes. On ne sait pas si les racines courtes disparaissent ou mûrissent avec le temps.
- **Les racines se développant depuis les aréoles** : développées quand les aréoles sont en contact avec le sol. Au début de leur développement, elles sont grossières et sans poils racinaires ; elles ont une coiffe racinaire proéminente, avec les cellules de l'épiderme formant des appendices ressemblant à des bractées. La croissance des jeunes racines est très rapide ; elles deviennent fines avec un cortex de 3-4 cellules d'épaisseur, et sont couvertes de poils racinaires. Dans certaines de ces cellules, un déficit hydrique induit la formation d'un plus grand nombre de cellules endodermiques avec des cadres de Caspary plus proches de la pointe de la racine (De Micco et Aronne, 2012).

LE CLADODE

O. ficus-indica est une plante CAM (métabolisme acide des Crassulacées), communément considérée comme résistante à la sécheresse, car il stocke une quantité considérable d'eau dans ses rameaux (Nobel, 1994, 1995). La morphologie et l'anatomie de ces rameaux ont évolué pour servir cette fonction.

Selon Buxbaum (1955), les cactaceae sont généralement caractérisées par leurs rameaux courts (les « aréoles », portant poils et épines), une tige succulente avec un cortex vert et l'absence de feuillage. Selon Hunt et Taylor (1986), les aréoles des Opuntioideae développent, en plus ou à la place des épines, des courts dards rappelant des poils appelés glochides. Chez *O. ficus-indica*, les organes tiges, connus sous le nom de cladodes, sont succulents et leur forme est typiquement oblongue à spatulée-oblongue, généralement 30-40 cm de long, quelques fois plus long (70-80 cm), et large de 18-25 cm. Anatomiquement le cladode en coupe transversale est une eustèle, formée par : la peau ; le cortex ; les tissus vasculaires, disposés en cercle et composés de faisceaux collatéraux séparés par du tissu parenchymateux ; et la moelle qui est le tissu succulent majeur.

La peau

La peau est composée d'une couche de cellules épidermiques et 6-7 couches de cellules hypodermiques, avec une épaisse paroi cellulaire ressemblant à du

collenchyme lamellaire. Les cellules épidermiques sont plates, fines et ont une forme proche de celle d'un pavé. L'épiderme et l'hypoderme forment une barrière efficace pour éviter les dommages physiques et maintenir l'intégrité mécanique. Les cellules épaisses de l'hypoderme sont très résistantes et jouent le rôle de première ligne de défense contre les champignons, les bactéries et le broutage par de petits organismes. La peau reste intacte très longtemps et est finalement remplacée par de l'écorce (périderme).

Le **périderme** est formé de cellules épidermiques, soit via le processus de vieillissement, soit par les tissus plus profonds du cortex quand des blessures causent une rupture de la peau. Quand l'écorce se forme depuis les épaisses parois cellulaires de l'hypoderme, elle se rompt.

L'**épiderme** constitue la couche de cellules la plus périphérique du corps du cactus. C'est une couche continue de cellules protectrices, qui comporte aussi des stomates (**Figure 1**). L'épiderme a trois fonctions principales :

- Réguler le mouvement du dioxyde de carbone entrant dans - et de l'oxygène sortant de - la plante.
- Retenir l'eau dans le corps de la plante.
- Protéger la plante contre les champignons, les insectes et l'intense lumière du soleil (Mauseth, 1984).

La paroi la plus à l'extérieur de l'épiderme est imprégnée et couverte d'une cire avec une substance lipidique appelée cutine. La cuticule des cactus, en comparaison avec la cuticule de la plupart des plantes, est relativement épaisse et peut atteindre pour l'*O. ficus-indica* 8-20 μm . En termes chimiques, la cutine n'est pas un produit pur comme la cellulose ; c'est un mélange d'acides gras qui polymérisent spontanément en présence d'oxygène. Non seulement la cutine est résistante à l'eau, mais elle est aussi l'un des produits chimiques les plus naturels connus (Mauseth, 1984).

L'examen de la surface de cladodes d'*O. ficus-indica*, en utilisant la microscopie électronique à balayage et transmission, révèle une mince couche d'agrégats de plaques semi-verticales d'une structure basique de cire. Cette couche donne aux cladodes leur apparence glauque. Selon Metcalf et Chalk (1979), la cire épicuticulaire présente sur *O. ficus-indica* correspond au groupe de base III, type classifié comme plaques et écailles.

La surface cireuse et rugueuse autour des cellules épidermiques sert un bon nombre de fonctions. En ce qui concerne l'équilibre hydrique, la cuticule retient la vapeur d'eau dans la plante et repousse l'eau de surface. La cuticule blanche reflète les radiations solaires, réduisant la température de la tige (Gibson et Nobel, 1986). Selon Mauseth (2006a), l'épiderme de la plupart des Cactaceae persiste durant des décennies comme un tissu vivant et transparent capable de faciliter les échanges gazeux. Cela contraste avec l'épiderme éphémère des tiges de la plupart des plantes à graines, qui dure tant



que la plante vit ou meurt quand l'écorce est formée sur les plantes pérennes. L'épiderme sur les cactus est présent et vivant tant que la couleur verte est visible sur le cortex sous-jacent.

Mauseth (2006a) mentionne aussi le fait que l'épiderme des Cactaceae présente une surface pliée, au lieu d'une surface lisse, affectant la force, la flexibilité et la capacité du rameau à gonfler sans se déchirer. Une surface plissée signifie que, quand l'eau est absorbée et le volume du rameau augmente, les bases des côtes s'écartent et le volume de la cote est augmenté sans requérir quelque augmentation de superficie que ce soit. Pendant que les bases des côtes s'élargissent, le cortex interne peut aussi s'étendre. En conséquence, il y a un changement de volume - mais pas de la superficie - des tiges, et il n'y a pas de dommages à l'épiderme ou à l'hypoderme (Mauseth, 2000).

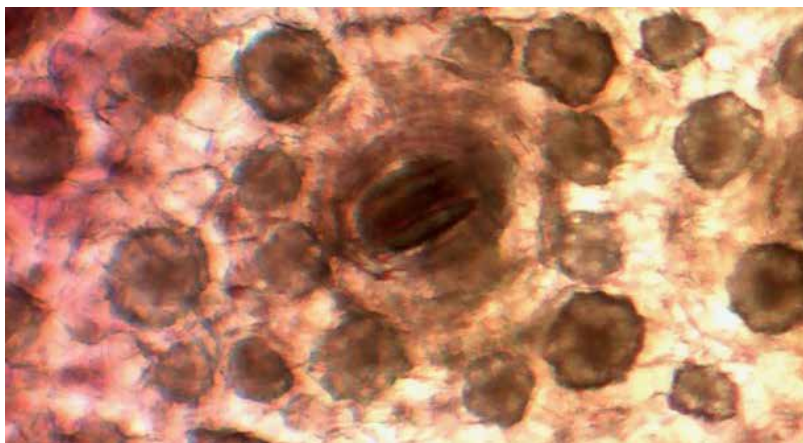


Figure 1
Stomates dans l'épiderme d'un cladode adulte. Les druses présentes sont visibles, entourant le stomate.

Les stomates sont abondants sur l'épiderme des tiges de la plupart des autres Cactaceae et sont régulièrement distribués sur les deux côtés de la totalité de la surface de la tige (Sajeva et Mauseth, 1991). Chez *O. ficus-indica*, ils sont aléatoirement distribués, peu nombreux et il y en a généralement 15-35 par mm² (Mauseth, 1984). Les cellules de garde ne diffèrent pas des autres plantes à fleurs ; elles sont de 40 µ et encastrées, de façon à ce que le pore soit caché de la surface de la tige. Un canal substomatocal proéminent, à travers le tissu hypodermique sclérenchymateux, forme un passage pour les échanges gazeux entre l'atmosphère et le tissu photosynthétique en-dessous de l'hypoderme ; la chambre sous-stomatocal est dans la couche de chlorenchyme (**Figure 2**). La paire de cellules de garde est entourée par 3-4 rangées de cellules subsidiaires. La surface épicuticulaire éclaircit ces cellules, et les stomates peuvent donc être observés avec un faible grossissement. Parmi les cellules épidermiques et l'hypoderme se trouve des agrégats cristallins d'oxalate de calcium, nommés druses (**Figure 1**).

Selon Mauseth (2006a), chez *O. ficus-indica*, la paroi cellulaire de l'épiderme tend à être fine, non épaissie et non lignifiée. L'épiderme est souvent plus fin qu'attendu pour un xérophyte et de longs trichomes multicellulaires unisériés sont abondants à chaque nœud, mais l'épiderme des entrenœuds n'a presque pas d'excroissances. Un hypoderme de plusieurs couches de cellules, avec des parois extrêmement épaisses et dures, est présent (Gibson et Horak, 1978 ; Mauseth et Ross, 1988 ; Mauseth, 1996, 1999b; Mauseth et Kiesling, 1997; Terrazas Salgado et Mauseth, 2002; Loza Cornejo et Terrazas, 2003; Terrazas Salgado et Arias, 2003).

Aréoles

Les aréoles sont ovales, à 2 mm sous la surface de la peau. Dans les conditions environnementales appropriées, de nouveaux cladodes, fleurs ou racines vont émerger depuis les tissus méristématiques des aréoles. Chez *O. ficus-indica*, les aréoles sont distribuées en une formation hélicoïdale, et ils développent des épines (au lieu de feuilles, comme la plupart des plantes le font). Quand le cladode est jeune, les aréoles se forment à la base du podarium (mamelon). Le podarium porte une petite structure subulée à vie courte, qui flétrit et tombe rapidement. Cette structure éphémère correspond à une feuille (**Figure 3**). Le podarium est proéminent au premier stade de développement du cladode, et se perd lorsque la tige vieillit. L'aréole commence à se former à la base même du court méristème apical, et très rapidement les épines se développent depuis le méristème basal (Mauseth, 1984) ; le nombre d'épines varie, mais il y a souvent une ou deux longues épines centrales et une autre épine latérale plus courte. Les longues épines centrales croissent pendant plus de temps que les autres ; elles sont plus épaisses parce qu'elles sont produites par des primordia plus robustes (Gibson et Nobel, 1986) et ont des cellules allongées avec une paroi cellulaire lignifiée. En même temps qu'elles croissent, des glochides apparaissent aussi.

Epines et glochides

La présence d'épines est la caractéristique particulière des aréoles et leur morphologie a une signification taxonomique potentielle (Robinson, 1974). Il est possible d'en distinguer deux types : épines et aiguillons (glochides). Selon Boke (1944), les glochides et les épines sont mieux considérés en tant qu'équivalents morphologiques des feuilles et les différences entre les deux sont quantitatives ; les deux types sont dérivés de la tunica et du corpus, tout comme les primordia de feuilles.

Le nombre et la durée des épines et des glochides chez *O. ficus-indica* dépendent de leur type. Généralement, les épines sont présentes au premier stade de croissance du cladode et la plupart tombent avec l'augmentation de la température, persistant parfois seulement à la base des cladodes pour une longue période.

Selon Robinson (1974), il est très simple de distinguer la sous-famille des Opuntioideae par la surface rugueuse des glochides et des épines. Chez *O. ficus-indica*, les épines ont une surface rugueuse et les glochides une surface lisse ; les glochides sont arrangés en groupes de 7-12 dans les cavités des aréoles. Les épines sont blanches ; une ou deux sont longues (1.0-1.5 cm) ; deux plus petites accompagnent chacune d'elles. Pendant que la pointe des épines se durcit, le méristème basal continue de s'allonger. Selon Gamong, cité par Buxbaum (1950), les épines sont formées en séries. Les glochides sont minuscules, courts et multicellulaires ; il est suggéré que les deux premières épines de l'aréole pourraient être des stipules où les cellules allongées lisses (au nombre de 14-16) forment une chaîne et ne se sclérifient pas. Ils sont bruns et donnent cette couleur aux aréoles. La surface des aiguillons est couverte de carbonate de calcium et de substances pectiques (Buxbaum, 1950). Les glochides sont groupés en 4-6 touffes serrées, desquelles il est possible d'en distinguer 2-3 quelques peu plus longs ayant une structure ressemblant à celle d'une épine. Ils sont durs, sclérifiés et pointus ; leur surface est couverte d'écailles barbelées, qui leur permet de se loger dans la peau et qui ne peuvent généralement pas être retirés facilement. Pendant qu'ils croissent, les glochides sont attachés à l'aréole, mais par la suite un phellogène se développe sur la région corticale extérieure autour de la base de chaque touffe. En conséquence, chez *O. ficus-indica*, ils sont décidos

et facilement retirés quand ils sont touchés ou soufflés par le vent. Leur fonction précise reste incertaine, mais ils peuvent condenser l'eau de l'air (Buxbaum, 1950). De plus, les épines aident à réduire la température diurne de la tige et leur présence diminue aussi l'interception de la lumière par le cladode.

Le cortex

La plupart des Opuntioideae ont un épais cortex palissadique chlorophyllien recouvrant un cortex interne moins ou non-chlorophyllien (Mauseth, 2005). Ceux avec des cladodes aplatis latéralement manquent de plis de surface. Chez *Opuntia*, le chlorenchyme repose sous l'hypoderme et constitue le tissu entre l'hypoderme et l'anneau de faisceaux vasculaires. Le chlorenchyme d'*Opuntia* est épais et succulent et consiste en un cortex primaire, formé à partir d'une masse plutôt homogène de cellules parenchymateuses. Il est chlorophyllien dans la partie extérieure et disposé en longues rangées radiales pour former un chlorenchyme palissadique proéminent, similaire au parenchyme palissadique d'une feuille. La partie intérieure est blanche et est formée de cellules parenchymateuses sphéroïdales similaires à celles du mésophylle lacuneux.

Toutes les espèces d'Opuntioideae avec des cladodes aplatis ont de larges (660-3600 nm) canaux remplis par des cellules mucilagineuses flottant librement dans le mucilage extracellulaire, non-attachées par la lamelle moyenne. Les canaux sont doublés avec un épithélium pluristratifié. Les canaux à cellules mucilagineuses se trouvent juste à l'extérieur du phloème primaire, s'élargissant en même temps que les cellules de l'épithélium intérieur se détachent et flottent dans le lumen (Mauseth, 1980, 2005).



Figure 2
L'épiderme avec 4-5 couches de cellules de l'hypoderme

Figure 3
Aréole sur un jeune cladode présentant deux épines, une feuille éphémère et plusieurs glochides brunâtres

Les parties vertes (chlorenchyme) et blanches (parenchyme) contiennent toutes deux des idioblastes, remplis avec du mucilage ou de cristaux plus petits que ceux des cellules épidermiques. Alors que la partie verte contenant les chloroplastes a la fonction principale de photosynthèse, la partie blanche est une simple poche de stockage d'eau. Le parenchyme est l'« usine chimique » qui produit les hormones, alcaloïdes et autres produits formés par le métabolisme de la plante (Mauseth, 1984 ; Saveja et Mauseth, 1991). Il n'a pas de chloroplastes, mais il y a d'autres organites - les amyloplastés - pour le stockage d'amidon. Il est fait de tissus parenchymateux homogènes, avec de petits espaces intercellulaires.

La fonction précise du mucilage n'est pas connue ; cependant on estime généralement qu'il aide à retenir l'eau à l'intérieur de la plante. Mauseth (1980) donne une explication détaillée du développement des cellules mucilagineuses. Des dictyosomes très actifs produisent des petits sacs ou « vésicules » de mucilage le long de leur paroi, et cette substance mucilagineuse est déposée en dehors du cytoplasme en même temps que la quantité de mucilage augmente. Par la suite, le cytoplasme meurt et les organites se décomposent, laissant seulement du mucilage, là où il y eut une fois une cellule vivante. Les cellules mucilagineuses sont présentes dans tous les types de tissus : hypodermique, cortical, vasculaire et moelle. Le mucilage est très glissant, complexe et formé par des glucides indigestibles (Gibson et Nobel, 1986).

La moelle

La moelle d'*O. ficus-indica* est faite de larges cellules parenchymateuses sphéroïdales qui ont des fines parois cellulaires, similaires à celles du cortex intérieur. La plupart des cellules de la moelle proches des faisceaux vasculaires contiennent de nombreux grains sphéroïdaux d'amidon ou du mucilage et quelques petites druses. De manière surprenante, la zone pérимédullaire (la moelle la plus à l'extérieur, adjacente au protoxylème et aux rayons médullaires) de certains Opuntioideae consiste en une trachéide de large bande (Mauseth, 2006a), un type de cellule lié plus au xylème qu'aux tissus parenchymateux tels que la moelle ou le cortex.

Les tissus vasculaires

Sous le cortex, *O. ficus-indica* a un anneau de faisceaux vasculaires collatéraux avec un tissu mou entre eux (eustèle), correspondant au cambium fasciculaire ou rayons médullaires. Les faisceaux vasculaires sont connectés au tissu méristématique des aréoles et forment un réseau élaboré de faisceaux accessoires aux tissus vasculaires très finement fenestrés. Comme Freeman (1970) le mentionne pour *O. basilaris*, l'anastomose de faisceaux des tiges est commune et résulte en la formation d'un

cylindre complexe autour de la moelle. Un réseau vasculaire est formé à chaque nœud par la fusion de deux sympodia et une trace foliaire avec une trace d'aréole et de nombreux faisceaux accessoires ; un système fermé est alors créé. Entre ces faisceaux, de larges espaces parenchymateux rhomboïdaux sont formés au-dessus du point où chaque trace foliaire diverge du réseau vasculaire vers les aréoles.

Le xylème est simple et ses éléments de vaisseaux (75 μ de large) sont plus nombreux que les éléments de vaisseaux épars (40 μ de large). Les vaisseaux primaires, ainsi que les éléments de vaisseaux des tissus vasculaires, sont caractérisés par des épaississements hélicoïdaux et annulaires, avec des perforations scalariformes ou réticulées dans la paroi secondaire (Hamilton, 1970). Les cellules mucilagineuses et les grains d'amidon sphéroïdaux sont abondants autour des faisceaux vasculaires. Freeman (1969) met en avant une théorie disant que les canaux ou conduits mucilagineux ne sont pas vraiment formés ; il y aurait plutôt une dégradation lysogénique des parois séparant les cellules mucilagineuses.

Toutes les tiges de cactus, même les cladodes les plus plats des Opuntioideae, ont un unique anneau de faisceaux vasculaires collatéraux (une eustèle, typique de toutes les plantes à graines non monocotylédones). Chez les cactaceae, ces tissus vasculaires primaires ont peu ou pas de traits inhabituels (Bailey, 1961; Gibson, 1976; Mauseth, 2004).

L'ÉCORCE

Avec peu d'exceptions, le phellogène des cactus provient des cellules de l'épiderme (Mauseth and Ross, 1988; Mauseth, 1989, 1996, 1999a, b; Mauseth and Kiesling, 1997; Terrazas Salgado and Mauseth, 2002). A cause du fait que le seul et unique phellogène soit superficiel, l'écorce de cactus consiste simplement en une alternance de bandes de cellules de suber et de sclérites (toutes deux produites par le phelloderme) ; il ne contient jamais d'hypoderme, de cortex, de phloème primaire ou secondaire, alors que c'est typique pour l'écorce de beaucoup de plantes à graines. Le cortex stockant de l'eau n'est jamais perdu. Les lenticelles semblent être absentes (Terrazas *et al.*, 2005).

LE BOIS

Chez les Opuntioideae, le bois a une très grande diversité : certaines espèces ont des bois fibreux ordinaires, alors que d'autres ont du bois à trachéides à larges bandes (TLB) (Gibson, 1977, 1978a, b ; Mauseth, 2006b). Il y a aussi deux variations dans les TLB chez



les Opuntioideae, puisque dans certains cas les TLB sont situées dans les rayons eux-mêmes. La distinction entre ces TLB situées dans le système de rayons et ceux dans le système axial n'est pas claire puisque les TLB existent dans les deux. La région axiale est définie par la présence de vaisseaux (et par les éléments de tubes criblés dans les régions correspondantes du phloème secondaire) et les rayons sont des zones sans vaisseaux (et les régions correspondantes du phloème secondaire manquent d'éléments de tubes criblés). Dans le même rameau, les TLB de rayon peuvent être distinctement plus larges que les TLB axiaux. Dans les autres variations d'Opuntioideae, les TLB se trouvent seulement dans les rayons, pas dans la zone axiale. Les rayons sont très larges, consistant en des TLB et du parenchyme. Les systèmes axiaux fusiformes dérivés des initiales consistent en seulement un ou deux rangs de vaisseaux et quelques cellules parenchymateuses axiales.

LES BOUTONS FLORAUX

Les bourgeons axillaires chez les cactus sont des aréoles, qui se sont développées très tôt dans l'axe des primordia des feuilles. Les aréoles commencent à évoluer comme une masse de cellules, qui rapidement deviennent un méristème apical normal de rameau avec toutes les zones nécessaires : la tunique, les cellules mères centrales, la zone périphérique et le méristème médullaire. Les épines et les glochides se développent à un stade très précoce. Après une période (variablement courte ou longue), le méristème au centre de la dépression des aréoles rentre en dormance. Quand il redevient actif et croît comme un rameau long au lieu d'un rameau court, il forme une branche avec des feuilles et des aréoles ou produit une sorte de long rameau très modifié, c'est la fleur (Pimienta Barrios, 1990).



Un état de l'art réalisé par Reyes Agüero et Valiente Banuet (2006) sur la biologie reproductive d'*Opuntia* indique que, contrairement aux autres cactaceae, le méristème qui peut produire soit un nouveau cladode ou une fleur ne va pas produire de nouveau. De plus 74% des bourgeons floraux d'*O. ficus-indica* croissent sur des cladodes d'un an, avec la plupart des bourgeons végétatifs éclochant sur des cladodes de deux ans. *O. ficus-indica* développe 20 bourgeons floraux ou plus par cladode, et pendant le développement de la fleur, le péricarpe maintient son activité photosynthétique et le développement aréolaire de glochides, d'épines et de feuilles. Quand le bourgeon floral d'*O. ficus-indica* est long de 0.5 cm, le gynécée et l'androcée peuvent être distingués au microscope. Les étamines se différencient rapidement en paires d'anthères, ayant chacun deux sacs de pollen. Les mêmes auteurs mentionnent que chez *O. ficus-indica* les ovaires ont beaucoup de carpelles, le nombre variant de 6 à 12 (généralement 8), qui croissent ensemble à la base et deviennent indépendantes à la région stigmatique. L'ovaire uniloculaire contient jusqu'à 270 ovules ou primordia de graines pesant entre 0.44 et 3.01 mg. Chez *O. ficus-indica*, l'anthèse a lieu après midi et les fleurs se ferment au coucher du soleil et s'ouvrent à nouveau le jour suivant. Au début de l'anthèse, les étamines sont groupées ensemble autour du style mais se séparent plus tard. La déhiscence des anthères peut se produire 12 heures avant ou au moment de la floraison.

Beaucoup de caractéristiques font que les **fleurs de cactus sont uni (Figure 4)**:

- Les segments du périanthe, faiblement différenciés comme pétales.
- Les étamines arrangées en spirales.
- Le pistil de quatre carpelles fusionnés ou plus, insérés dans le réceptacle floral.



Figure 4

Section longitudinale d'une fleur entièrement développée, montrant l'ovaire infère avec de nombreux ovules et le cortex, les pétales, les étamines et le pistil

Figure 5

Bourgeon floral sur le bord d'un cladode entièrement développé

- Un ovaire uniloculaire avec une placentation pariétale, apparemment encastré dans la fin d'une branche modifiée (Boke, 1980).

De plus, les cactus font partie du peu de plantes chez lesquelles l'extérieur d'un ovaire infère, appelé réceptacle, présente des feuilles et des aréoles parfaites. Ces structures deviennent plus tard la peau du fruit. En même temps que le bourgeon émerge, il est possible de voir s'il est végétatif ou reproductif en fonction de son volume spatial. Les bourgeons reproductifs sont plus sphériques (**Figure 5**), alors que les végétatifs sont plus plats.

La proportion de bourgeons floraux par rapports aux bourgeons végétatifs est de 3 : 1, et 10% des cladodes peuvent avoir les deux sortes de bourgeons en proportions égales (Sudzuki Hills *et al.*, 1993). Les fleurs sont hermaphrodites et actinomorphes. Elles se développent sur la partie supérieure des cladodes d'un ou deux ans, et occasionnellement sur des cladodes de trois ans. Les deux types de bourgeons se développent généralement sur la surface du cladode ayant la plus grande exposition à la lumière.

La différenciation florale se produit sur une courte période de 50-60 jours après que le méristème ait commencé à être actif, jusqu'à la fin de l'anthèse, contrastant avec beaucoup d'autres arbres fruitiers (pommier, poirier etc.) pour lesquels la différenciation florale commence l'année d'avant (Pimienta Barrios et Engleman, 1985). La partie stérile de la fleur est représentée par le périanthe et il y a peu de différences entre les sépales et les pétales : les sépales sont plus petits, mais tous deux sont oblongs et fusionnés à la base, avec des pétales brillants jaunes ou roses. Les fleurs jaunes changent de couleur après fécondation, vers l'orange ou le rose. Les nombreuses étamines sont fixées à la base et insérées dans la cavité du réceptacle dans un arrangement fasciculé, se développant de manière centrifuge de telle sorte que le verticille intérieur soit sous le pistil et que le verticille supérieur soit à la hauteur des stigmates. Les filets sont libres et les anthères produisent une grande quantité de grains de pollen secs, qui sont libérés avant la maturité des ovules (protandrie).

Selon Pimienta Barrios (1990), les anthères ont un mouvement thigmotropique. Au début de l'anthèse, les étamines sont proches du style et les anthères sont en contact avec la base du pistil. Ce processus est connu sous le nom de cleistogamie et la protandrie des fleurs explique la nature autogame d'*O.ficus-indica* (Rosas et Pimienta Barrios, 1986). La pollinisation est entomophile quand la fleur est ouverte ; le stigmate est placé au-dessus des étamines (Pimienta Barrios, 1990).

Le pistil a un large style à la base et un stigmate prédominant divisé, granuleux et visqueux formé par dix septums et ayant la forme d'une anthère. L'ovaire est syncarpe, uniloculaire, formé de cinq carpelles et a une

placentation pariétale.

Chez *Opuntia*, le funicule est mince et relativement long ; les ovules ont de vrais téguments (Archibald, 1935), avec l'interne allant au-delà de l'externe. Le troisième tégument est une partie modifiée d'un des deux téguments normaux et il entoure complètement l'ovule (Eames, 1961). Les ovules sont circinotropes, puisque le funicule entoure l'ovule et couvre le micropyle comme un épais troisième tégument. Il est possible d'observer cette structure sur les graines d'*O.ficus-indica*, où il est présent avec le pore du micropyle assez libre.

La surface intérieure du funicule est couverte avec une sorte de poils - « papillae » - spécialement à l'endroit où le funicule touche le micropyle. Les ovules sont arrangés en deux rangs dans chaque suture ventrale proéminente. Cette situation peut suggérer que l'union de carpelles est de bord à bord, et les faisceaux dorsaux s'étendent aux ovules (Boke, 1980).

LE GRAIN DE POLLEN

Le grain de pollen a une épaisse paroi externe, l'exine, qui a des fonctions protectrices. Son volume change en fonction du niveau d'humidité (Eames, 1961). La couche interne est l'intine ; elle est fine et s'adapte facilement à des changements de taille. Les motifs de l'exine ont une valeur taxonomique et phylogénétique considérable, puisque la paroi peut devenir très épaisse et complexe en structure et la couche extérieure est sculptée avec des arrêtes saillantes, des épines et des granules. Chez *Opuntia*, les grains de pollen sont sphéroïdaux, réticulés et poly-colpé ; ils ont 18 colpi - c'est-à-dire similaire au grain de pollen d'*O. fuscicaulis* décrit par Scheinvar (1995), qui avait 20 colpi. Il y a un grand nombre de grains de pollen et il est possible d'observer, 24 heures après l'anthèse, les tubes polliniques germés sur la surface glandulaire épidermique du large canal styloïde. La fécondation des ovules commence graduellement 48 heures après l'anthèse et continue pendant 10 jours. Ce mode de fécondation a été nommé par Rosas et Pimienta Barrios (1986) « *progamyc* ». Le nombre moyen d'ovules fécondés par fleur dépend du cultivar (Rosas et Pimienta Barrios, 1986).

Chez *O. ficus-indica*, 18.4 à 30.1% des grains de pollen déposés sur le stigmate germent et forment des tubes polliniques. Jusqu'à 397 tubes peuvent être formés chez cette espèce, et ils se développent sur l'épiderme glandulaire du conduit intérieur du style. La plupart des tubes sont initiés sur le stigmate et croissent vers la base du style. Les tubes polliniques atteignent la base du style 48 heures environ après la pollinisation et la fécondation de l'ovule commence 72 h plus tard. Après 4 jours, 48% des ovules sont fécondés (Rosas et Pimienta



Barrios, 1986). La polyembryonie d'origine nucellaire est commune chez *Opuntia*. Cela explique le développement de deux ou trois plantes à partir d'une seule graine. Archibald (1935) a estimé que la polyembryonie nucellaire, avec le développement de l'endosperme et sans fécondation, se produit chez *O. ficus-indica* et d'autres cactus.

LE FRUIT

Le fruit d'*O. ficus-indica* est une simple baie charnue formée par un ovaire infère enfoncé dans les tissus de tige du réceptacle. La peau vient du réceptacle et a la même morphologie que le cladode :

- Un épiderme avec des feuilles éphémères et de parfaites aréoles ; les glochides sont plus permanentes que sur les cladodes.
- Un hypoderme mince et un cortex volumineux.
- Une abondance de cellules mucilagineuses, mais pas de cristaux.

La **pulpe** est formée par le développement des trichomes qui viennent des cellules épidermiques du funicule et de l'enveloppe funiculaire (Pimienta Barrios et Engelman, 1985). La taille du fruit dépend du nombre d'ovules fécondés et du nombre de graines qui avortent (Archibald, 1935; Pimienta Barrios, 1990; Barbera *et al.*, 1994). On ne sait pas encore pourquoi des graines avortent.

Les fruits ont souvent deux sortes de **graines** stériles, dont l'une est quelquefois prédominante. Le manque de viabilité des graines est lié à l'avortement de l'ovule ou du jeune embryon adventif (Archibald, 1935). Dans le second cas, le nucelle continue à croître, même après que l'embryon soit formé, et au moment où le funicule est formé, il se change en une couche dure lignifiée. Au Chili, de nombreux fruits d'*O. ficus-indica* ont révélé un

troisième type de graines non viables. C'est une forme anormale, résultant probablement aussi de la transformation du funicule en une couche dure, mais avec un développement actif du nucelle, qui finalement émerge à travers le pore micropylaire qui n'était pas bloqué par l'ovule. Dans les cultivars d'*O. ficus-indica*, la présence d'un grand nombre de graines normales est considérée comme un obstacle à sa commercialisation. Les cultivars italiens ont une moyenne de 273 graines par fruit, dont 146 sont normales et 127 sont stériles. Les cultivars israéliens ont une moyenne de 268 graines normales par fruit et les cultivars mexicains 203 graines normales par fruit (Reyes Aguëro et Valiente Banuet, 2006).

Le diamètre équatorial représente le mieux le **poids** frais et sec du fruit. La comparaison entre le développement de la peau et la portion comestible révèle que la croissance de la peau est plus importante pendant les premières semaines après la floraison, alors que la portion comestible commence à plus se développer dans les 5-6 dernières semaines avant la maturation. Selon l'analyse de la littérature par Reyes Aguëro et Valiente Banuet (2006) sur la biologie reproductive d'*Opuntia*, le fruit d'*O. ficus-indica* croît vigoureusement en longueur, largeur, poids et volume dans les premiers 20-30 jours après l'anthèse ; il s'arrête de grandir approximativement 59-60 jours après l'anthèse. La peau croît le plus rapidement pendant le stade 1 de la croissance du fruit, la graine a une croissance maximale au stade 2 et la croissance maximale de la pulpe se produit pendant les stades 2 et 3. Le poids du fruit est affecté par l'ordre de production des bourgeons floraux et le nombre de fruits sur le cladode. Par conséquent, les bourgeons floraux qui poussent plus tôt deviennent habituellement les fruits les plus lourds. De plus, les fruits les plus lourds sont obtenus sur des cladodes ayant seulement six fruits.





Ecophysiologie et biologie de la reproduction des cactus cultivés

Paolo Inglese^a, Giorgia Liguori^a et Erick de la Barrera^b

^a Département des Sciences Agricoles et Sylvicoles, Université de Palerme, Italie

^b Institut de Recherche sur les Ecosystèmes, Université Nationale Autonome de Mexico, Mexico, Mexique



INTRODUCTION

Le figuier de Barbarie - *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. - est une plante CAM (métabolisme acide crassulacéen) cultivée dans une large gamme d'environnements, donnant lieu à des différences majeures de survie et du développement des plantes, et de potentiel de récolte. Le succès écologique des opuntias, spécifiquement *O. ficus-indica*, est largement dû à la particularité de leur mode quotidien d'assimilation du carbone et de perte d'eau, toutes deux ayant lieu principalement pendant la nuit. Comme les autres plantes CAM, le figuier de Barbarie ouvre ses stomates la nuit pour fixer du CO₂ et accumuler du malate et le stocker dans les vacuoles des cellules du chlorenchyme. Puisque les températures nocturnes sont plus basses que les températures diurnes et que l'humidité relative est généralement plus élevée, la transpiration des plantes CAM est trois à cinq fois plus faible que celle des plantes C₃ et C₄ (Nobel, 1988). Il en résulte une énorme augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau et de la capacité de la plante à prospérer dans des environnements semi-arides caractérisés par des apports d'eau restreints (200-300 mm de précipitations annuelles) ou là où il y a de longues périodes de sécheresse et des températures relativement élevées. Les mécanismes d'adaptation à l'aridité ne sont pas nécessairement valables envers les températures élevées. Bien qu'elles se produisent la nuit, l'assimilation du CO₂ et l'accumulation d'acide sont fortement influencées par les variables environnementales telles que la température de l'air, la lumière, l'état hydrique de la plante, les nutriments et la salinité du sol (Nobel, 1988). En effet, dans les zones d'origine du plateau mexicain central (1800-2200 m au-dessus du niveau de la mer), les précipitations sont inférieures à 500 mm, la température moyenne annuelle varie entre 16 et 18°C et la température maximale journalière du mois le plus chaud n'excède pas 35°C (Pimienta Barrios, 1990).

Dans les mesas mexicaines (plateaux), la saison sèche coïncide avec un hiver froid alors que la saison chaude, pendant laquelle la croissance végétative et la croissance des fruits ont lieu, est très humide et pluvieuse ; exactement l'opposé se produit dans le bassin méditerranéen où la saison sèche coïncide avec les jours les plus chauds quand le fruit se développe et la croissance végétative se poursuit (Inglese *et al.*, 2002b). En Sicile, où *O. ficus-indica* est cultivé pour la production de fruits, les précipitations annuelles sont d'environ 500 mm et les températures moyennes annuelles varient

de 15 à 18°C, avec des pics à 37°C en août, pendant la période de développement du fruit (Inglese, 1995). *O. ficus-indica* est très répandue en Afrique du nord (Monjauze et Le Houérou, 1965a), dans les hauts-plateaux (2000-2500 m au-dessus du niveau de la mer) du Tigray en Ethiopie, et en Afrique du Sud. En contraste, il est absent des régions ayant des précipitations inférieures à 350 mm et des températures journalières maximales d'été supérieures à 42°C, telles que la ceinture Sahélienne, le désert de Mojave en Californie ou le désert du Rajasthan en Inde (Felker et Inglese, 2003). Le Houérou (2002) décrit des plantations à Aziza (Lybie) où les températures maximales peuvent excéder 50°C. Les cladodes *O. ficus-indica* ne peuvent pas survivre à 70°C (Nobel, 2002).

Les fruits d'*O. ficus-indica* peuvent être récoltés de juillet à novembre dans l'hémisphère nord - Bassin Méditerranéen, Californie et Mexique - et de janvier à avril dans l'hémisphère sud, en fonction du génotype et de l'interaction génotype x environnement. Une nouvelle floraison induite ou naturelle peut étendre la période de maturation à janvier-février dans l'hémisphère nord et à septembre-octobre dans l'hémisphère sud. Une floraison presque continue a été observée à Salinas, en Californie (Bunch, 1996), permettant une période de maturation étendue.

LE CYCLE CAM

Attribué à l'origine à la famille des Crassulaceae, le CAM représente un mécanisme de concentration du CO₂ qui a évolué en réponse à la sécheresse dans les environnements terrestres et au manque de carbone inorganique dans les milieux aquatiques (Keeley, 1998).

Le CAM se retrouve chez 16 000 espèces (6 à 7% des espèces de plantes), appartenant à plus de 300 genres d'environ 40 familles, allant de la forêt décidue tropicale aux platyopuntia de désert et aux cactus colonnaires. La grande majorité des plantes utilisant le CAM sont des Angiospermes. La plupart d'entre elles sont soit des épiphytes (par exemple les orchidées, les broméliacées) soit des xérophytes succulentes (par exemple les cactus, les *Euphorbes* cactoides) ; mais le CAM se rencontre aussi chez les lithophytes, les broméliacées terrestres, l'halophyte *Mesembryanthemum crystallinum*, une plante terrestre non succulente (*Dodonaea viscosa*) et une plante de mangrove (*Sesuvium portulacastrum*).

Caractéristiques du CAM et succulence

- Séparation de l'assimilation du CO₂ et de la décarboxylation - temporellement et spatialement.
- Réduction de la transpiration due à l'ouverture nocturne des stomates - et les organes aquifères contiennent 90 à 95% d'eau comparé aux 40-70% des bois non succulents.
- Des pertes d'eau réduites - Pour le même degré d'ouverture des stomates, pendant l'assimilation diurne de CO₂, les plantes CAM perdent 20-30% de l'eau perdue par les plantes C₃ ou C₄.
- Un ratio racines/tiges faible et une croissance rapide des racines pendant les conditions humides.
- Subérisation des cellules corticales, avec la formation d'interstices sol-racine pendant le dessèchement du sol.
- Recyclage interne de l'eau du parenchyme vers le chlorenchyme - ce qui maintient la turgescence des tissus photosynthétiques sur une large gamme de teneur en eau.
- Apport de l'eau et des solutés aux fruits via le phloème (la pression osmotique du phloème est relativement faible : 0.94 MPa (2-3 fois moins que chez la plupart des autres plantes vasculaires)).

Le métabolisme CAM peut être résumé comme suit (**Figure 1**):

- **Phase 1.** Durant la nuit, la fixation du CO₂ a lieu quand les stomates s'ouvrent et que le CO₂ se diffuse dans les espaces intracellulaires du mésophylle puis dans le cytosol, où il est lié à du phosphoénolpyruvate (PEP), un composé à trois C, grâce à la PEP carboxylase (PEPc). L'enzyme catalyse la formation d'oxaloacétate qui peut être transformé en malate par NAD⁺ malate déshydrogénase. Pour éviter l'inhibition, le malate est activement transporté du cytosol vers la vacuole, où il est converti en acide malique, engendrant une augmentation sensible de l'acidité. Les vacuoles des cellules du chlorenchyme occupent plus de 90% du volume des cellules à cause de l'accumulation nocturne d'acides organiques.
- **Phase 2.** Tôt le matin, la transition a lieu entre l'activité de la PEPc et de la Rubisco.
- **Phase 3.** Pendant la journée, les plantes ferment leurs cellules de garde, les stomates sont scellés et le pH augmente. Le malate se diffuse hors de la vacuole et est décarboxylé. Le CO₂ est relâché (augmentant de 0.2 à 2.5%) dans le cytosol et est fixé par le cycle de Calvin dans les chloroplastes par la ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase (Rubisco) menant à la synthèse d'amidon ou autres glucanes.
- **Phase 4.** En fin d'après-midi, la PEPc devient active. Dans des conditions environnementales très sèches, le cycle CAM pourrait être réduit à cette unique phase.

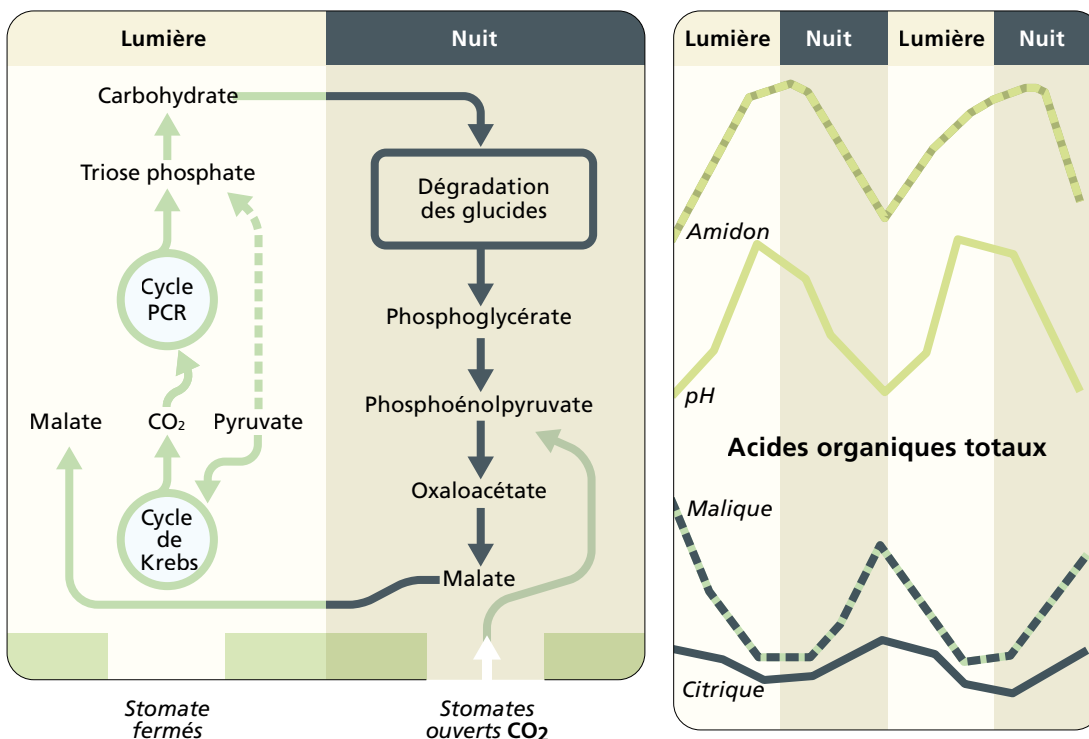


Figure 1
Métabolisme acide crassulacéen (CAM)

La mesure des échanges gazeux chez *O. ficus-indica* a commencé au début des années 1980, quand Nobel et Hartsock (1983) ont mesuré l'assimilation de CO₂ sur des cladodes individuels. A des conditions optimales de température et de radiations interceptées, les valeurs instantanées d'assimilation nette de CO₂ d'un cladode d'un an peuvent atteindre 18 μmol m⁻² s⁻¹ avec un total journalier d'assimilation de CO₂ de 680 mmol m⁻² (Nobel et Bobich, 2002). Cependant, bien que la détermination de la photosynthèse nette (Pn) de cladode individuel soit utile pour estimer le taux d'échanges gazeux par unité de surface, son utilisation pour estimer les échanges gazeux de la canopée entière est limitée parce qu'il peut y avoir une large variabilité de l'assimilation du carbone au sein de la canopée. Une variabilité qui serait due aux différences d'âge des cladodes (Samish et Ellern, 1975), le rayonnement intercepté (Nobel, 1988), la charge de fruits (Inglese *et al.*, 1994b), la relation source-puits (Pimienta Barrios *et al.*, 2005) et la réponse aux stress abiotiques (Nobel et Bobich, 2002).

Peu de données sont disponibles sur l'assimilation nette de CO₂ du cladode en fonction de son âge. Samish et Ellern (1975) ont remarqué que l'acidité titrable diminue linéairement avec l'augmentation de l'âge, et les cladodes d'un an ont un niveau d'acidité trois fois plus élevé que les cladodes de 2 ans en position basipète. La translocation du carbone des cladodes de deux ans pour répondre à la demande de photoassimilats des cladodes fructifères d'un an a fait l'objet d'hypothèses (Inglese *et al.*, 1994b ; De la Barrera et Nobel, 2004) et la répartition du carbone entre cladodes Père et Fils change selon le stade de développement du cladode et les conditions environnementales (ombre, disponibilité en eau) (Luo et Nobel, 1993 ; Pimienta Barrios *et al.*, 2005). L'assimilation du CO₂ des cladodes de deux ans

tout au long de la saison peut être 40% plus faible que celle des cladodes d'un an (Liguori *et al.*, 2013a).

Statistiques liées au CAM

- *O. ficus-indica* indica peut assimiler 344 à 680 mmol de CO₂ m⁻² jour⁻¹ (C = 35%).
- La valeur instantanée maximale d'assimilation de CO₂ par le cladode = 18 μmol m⁻² s⁻¹.
- Deux semaines après la floraison, le fruit peut atteindre une assimilation nette de CO₂ de 42 mmol m⁻² jour⁻¹, c'est-à-dire 20% de celle des cladodes au même endroit et au même moment de l'année.
- chez les plantes CAM, il existe 10 à 30 stomates mm⁻² contre 100 à 300 mm⁻² chez les plantes C₃.
- Le ratio racine / tige varie de 0.12 (Nobel, 1988) à 0.09 (Inglese *et al.*, 2012) et 0.20 (Inglese *et al.*, 2012) sur des arbres matures irrigués.
- La couche de cire de l'épiderme est de 10-50 μm contre 0.2-2 μm sur les feuilles de C₃ ou C₄.
- Le chlorenchyme d'*O. ficus-indica* peut réversiblement perdre 70% de sa teneur en eau à pleine turgescence et le parenchyme peut en perdre jusqu'à 82%, en gardant tous les deux la capacité d'une récupération totale.
- Après une période de 15 jours de sécheresse, le parenchyme perd 60% de sa teneur en eau et le chlorenchyme 25% (Goldstein *et al.*, 1991).

Du soleil plutôt que des nuages

- L'absorption de la lumière et du CO₂ sont décalées dans le temps et l'ouverture nocturne des stomates

TABLEAU 1 Caractéristiques fonctionnelles et classes de sols adaptées à la culture d'*O. ficus-indica*

Caractéristiques fonctionnelles		Classes			
		S1 Mieux adapté	S2 Adapté	S3 Moins adapté	N Non adapté
Température minimale	°C	> 3	> 3	> -3; < 3	< -5
Température moyenne	°C	18-23	15-18	10-15	< 10
Précipitations annuelles	mm	> 400	> 400	200-400	< 100
Texture		Sableux à mixte		Argilo-limoneux	Argilo-limoneux
Squelette		Indifférent	Indifférent	Indifférent	Abondant
Profondeur		Indifférent	Indifférent	Indifférent	Indifférent
Carbonates		Indifférent	Indifférent	Indifférent	Indifférent
Acidité	pH _{KCl}	5-8	5-8	5-8	< 5; > 8
Matière organique	%	< 0.5	< 0.5	> 0.5	> 0.5
Ca disponible		élevé	élevé	Moyen	Insuffisant
K disponible		élevé	élevé	Moyen	Insuffisant
CE _e ^a	dS m ⁻¹	< 2	2-4	4-7	> 7
Eaux souterraines sous-superficielles		Absentes	Absentes	Absentes	Présentes

^a EC_e = conductivité électrique de l'extrait de sol saturé



dépend plus de la valeur journalière du FPP que de sa valeur instantanée.

- Le point de compensation est à $FPP = 3 \text{ moles m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$.
- Le point de saturation est à $FPP = 30 \text{ moles m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$.
- À $FPP = 22 \text{ moles m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$, l'assimilation du CO_2 est à 90% de son maximum.

L'APTITUDE DES SOLS À LA CULTURE DU FIGUIER DE BARBARIE

L'espèce croît dans tous les types de sols. Elle s'adapte fréquemment même aux sols limités par une roche dure continue endéans les 25 premiers cm, qui reposent sur des matériaux avec une teneur en carbonate de calcium > 40% ou qui contiennent moins de 10% en poids de particules fines (Nobel, 2002). En général, *O. ficus-indica* est très adaptable, mais il est sensible à la salinité et à la saturation en eau puisque le système racinaire est très sensible à l'anoxie (**Tableau 1**). Pour la production commerciale de l'espèce, le seuil de concentration en sel de la solution du sol est de 50 mM NaCl (Nobel, 2002). Une concentration de 30 mol m^{-3} (1.76 ppt NaCl) réduit la croissance de 40%, comparé au témoin non-salin, alors qu'une concentration de 100 mol m^{-3} (5.85 ppt NaCl) réduit la croissance de 93% (Gersani *et al.*, 1993). Il tolère bien un grand volume d'air dans le sol (forte macroporosité texturale et structurale) et une modeste ou faible teneur organique. Concernant les besoins édaphiques, une ample disponibilité du calcium et du potassium est favorable pour une bonne récolte.

ASSIMILATION DE CO_2 ET DISPONIBILITÉ DE L'EAU

L'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE de l'anglais *Water-Use Efficiency*) atteint des valeurs approximatives de 3.3-4.0 g de matière sèche (MS) kg^{-1} d'eau (De Kock, 1980 ; Le Houérou, 2002). Pour les jeunes cladodes, l'eau se déplace initialement à travers le phloème alors que l'absorption d'eau via le xylème ne commence qu'un mois environ après leur apparition (Wang *et al.*, 1997). La transition de puits à source est aussi accompagnée par une inversion de la différence de potentiel hydrique entre le jeune cladode et le cladode père. Plus spécifiquement, le potentiel hydrique est initialement plus élevé dans les très jeunes cladodes que dans les cladodes pères, et il devient plus faible dans les jeunes cladodes après 4 semaines de croissance (Luo et Nobel, 1993 ; Wang *et al.*, 1997). La succulence du cladode agit comme un tampon pour maintenir la turgescence dans les tissus photosynthétiques (chlorenchyme), offrant au cladode la possibilité de poursuivre la photosynthèse pendant les périodes sèches.

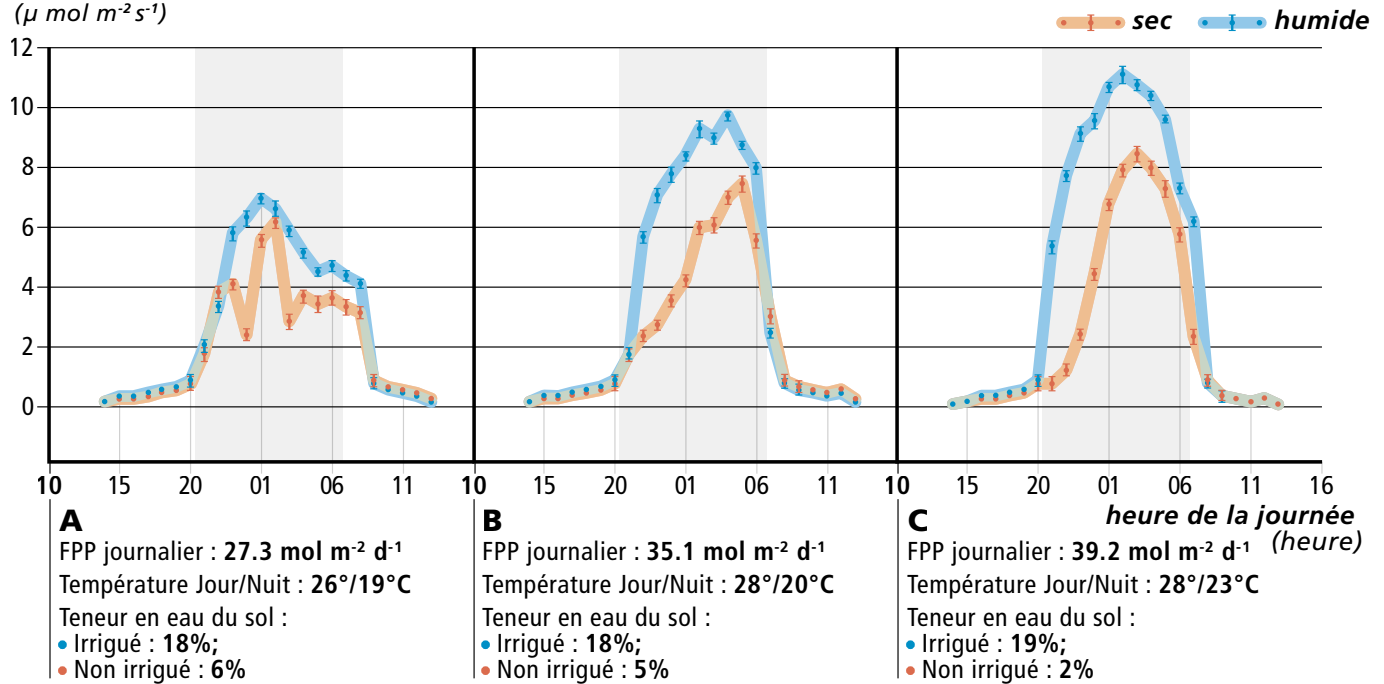
Les longues périodes de sécheresse ont plusieurs effets physiologiques sur le figuier de Barbarie. Dans des conditions optimales (25/15°C jour/nuit) et à saturation lumineuse, *O. ficus-indica* peut assimiler 3.44 g $\text{m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ de CO_2 . Nobel et Hartssock (1984) ont montré que trois semaines de sécheresses sont nécessaires pour diminuer de moitié l'assimilation nette de CO_2 d'un cladode sur une période de 24 heures ; après 50 jours de sécheresse, l'assimilation nette de CO_2 des cladodes est proche de zéro (Acevedo *et al.*, 1983). En outre, 3 mois de sécheresse diminuent l'accumulation nocturne d'acides de 73%, essentiellement en arrêtant la transpiration et mènent à une diminution du poids frais (PF) du parenchyme de 61%, alors que le chlorenchyme perd seulement 27% d'eau (Acevedo *et al.*, 1983 ; Goldstein *et al.*, 1991). Les températures optimales pour l'assimilation nette de CO_2 nocturne du cladode sont réduites si les plantes sont dans des conditions de sécheresse (Nobel et Hartssock, 1984), surtout quand le déficit hydrique est prolongé (Nobel, 2001). Après une sécheresse prolongée, la teneur relative en eau, l'épaisseur du cladode (parenchyme) et la teneur en chlorophylle des cladodes individuels déclinent sévèrement (Pimienta Barrios *et al.*, 2007). Dans des conditions de stress hydrique, le parenchyme est à peine distinguable du chlorenchyme qui l'entoure (Barcikowski et Nobel, 1984 ; Liguori *et al.*, 2013a). La capacité des tissus parenchymateux à stocker de l'eau et à la transférer au chlorenchyme produit, dans des conditions de stress, un effet « tampon » efficace en réponse aux différents besoins physiologiques (Nobel, 2002). La pression osmotique du parenchyme et du chlorenchyme est peu affectée après trois semaines de sécheresse, alors que la pression de turgescence est réduite de 86% en comparaison avec des conditions de bonne irrigation (Goldstein *et al.*, 1991).

Les fluctuations sur 24 heures de l'épaisseur du cladode peuvent aussi représenter un indicateur précoce de stress de déshydratation. Les jeunes cladodes montrent des fluctuations de l'épaisseur du cladode sur 24 heures plus prononcées que les plus vieux cladodes, et par conséquent servent de modèle adapté pour l'évaluation des réponses de la plante aux facteurs environnementaux. Dans de bonnes conditions d'irrigation, les fluctuations de l'épaisseur du cladode sur 24 heures sont directement liées aux variations de température, mais ne le sont pas lors d'un stress hydrique sévère (Scalisi *et al.*, 2015). De plus, la croissance du cladode est extrêmement sensible à la réhydratation après de longues périodes de sécheresse, suggérant qu'une réduction régulée de l'irrigation n'affecterait pas significativement la biomasse de la plante.

De manière surprenante, les mesures intégrant les échanges gazeux de l'arbre entier prouvent que les arbres d'*O. ficus-indica* continuent leur activité photosynthétique 60 jours après l'arrêt de l'irrigation et quand la teneur en eau du sol est < 5% (**Figure 2**). A ce stade, les cladodes de l'année et d'un an des arbres non



Assimilation nette de CO₂ ($\mu\text{ mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)



Mesures réalisées avec des chambres ouvertes couvrant chacune un arbre, trois arbres pour chaque traitement (sec et humide) (a : juin, b : juillet, c : août). Les pointillés correspondent à la période nocturne.

Figure 2
Assimilation nette journalière de CO₂ pour des *O. ficus-indica* irrigués et non irrigués cultivés en pots

irrigués sont devenus flasques, mais l'assimilation journalière nette de CO₂ de l'arbre entier se maintient au même taux qu'au début de l'expérimentation alors que, au cours de la saison, les plantes bien irriguées ont doublé leur assimilation nette de CO₂. Finalement, l'assimilation journalière de CO₂ de l'arbre entier, qui intègre les cladodes de différents âges capacités photosynthétiques, est bien en dessous des valeurs mesurées pour des cladodes individuels dans des conditions similaires (humides ou sèches) (Nobel et Bobich, 2002 ; Pimienta Barrios *et al.*, 2005) - une indication de la contribution différente de chacun des cladodes à la photosynthèse de l'arbre entier. La capacité des arbres d'*O. ficus-indica* à maintenir substantiellement leur activité photosynthétique, même quand ils ont perdu la plus grande partie de l'eau du parenchyme, est probablement liée au mouvement de l'eau (des cladodes les plus vieux vers les plus jeunes) et aux transferts de l'eau entre tissus (du parenchyme au chlorenchyme) réduisant les pertes d'eau des tissus photosynthétiques (Barcikowski et Nobel, 1984 ; Nobel, 2006). Selon Goldstein *et al.*, (1991) et Nerd et Nobel (1991), après une période de sécheresse de 15 semaines, la teneur en eau du cladode diminue d'environ 60% et le parenchyme aquifère perd une plus grande fraction d'eau (65%) que le chlorenchyme (27%), ce qui, très probablement, aide à maintenir l'accumulation nocturne d'acides dans les tissus du chlorenchyme. Le chlorenchyme d'*O. ficus-indica* peut réversiblement perdre 70% de l'eau qu'il peut

contenir à pleine turgescence et le parenchyme aquifère peut en perdre 82% (Andrade *et al.*, 2009) ; en effet, quand les précipitations arrivent après une longue période sèche, les cladodes réhydratés montrent une récupération complète en termes de poids frais et sec et de comportement des taux d'échanges gazeux (Pimienta Barrios *et al.*, 2005). Le carbone accumulé, en absence de fruit, est réparti dans les cladodes bien hydratés sur le parenchyme des cladodes d'un et deux ans et la pousse de l'année. D'un autre côté, la matière sèche accumulée durant la période de sécheresse est probablement destinée aux tiges plus anciennes et au système racinaire, qui sont responsables du rétablissement de la plante après une longue période de sécheresse (Nobel, 1988). Les racines d'arbres d'*O. ficus-indica* non irrigués durant 18 mois, incorporent 23% plus de carbone depuis les cladodes basaux que les arbres bien irrigués (Luo et Nobel, 1993). Changer l'allocation du carbone en faveur des racines contribue à la résistance à la sécheresse chez les plantes pérennes et les arbres ligneux et facilite leur rétablissement après de longues périodes de stress hydrique (Da Costa et Huang, 2009 ; Faust, 1989). De plus, la teneur en sucres solubles diminue habituellement avec la sécheresse, associée avec une augmentation équivalente de polysaccharides, vraisemblablement de l'amidon, dans le parenchyme aquifère, mais pas dans le chlorenchyme (Nerd et Nobel, 1991).

Dans les zones où il n'y a pas de pluie (< 30-50

mm) pendant la période de développement des fruits ou là où les précipitations annuelles sont inférieures à 300 mm (Gugliuzza *et al.*, 2002a), *O. ficus-indica* a besoin d'irrigation supplémentaire pour obtenir des rendements adéquats et une bonne qualité de fruits (> 120 g PF) (Barbera, 1984 ; Gugliuzza *et al.*, 2002a ; Van der Merwe *et al.*, 1997). Le calibre des fruits est réduit par un déficit hydrique bien longtemps avant que l'arbre ne montre des symptômes de stress hydrique (Gugliuzza *et al.*, 2002a). En effet, la plante est capable de recycler l'eau intrinsèque et fournir de l'eau au fruit à travers le phloème (Nobel, 2002). Nerd *et al.* (1989) rapportent que dans le désert de Néguev, où les précipitations annuelles sont inférieures à 300 mm, l'irrigation hivernale régule la fertilité des plantes et le moment de l'éclatement printanier au printemps. Cependant l'irrigation seule ne peut pas contrecarrer les effets des très hautes températures qui affectent le taux d'échange de carbone plus que la transpiration et résultent toujours en une réduction de la croissance des fruits et une avancée de la maturité, même avec de l'irrigation. Consoli *et al.* (2013) - dans les zones sans pluies estivales (juin-septembre) et avec des précipitations annuelles de 500 mm - ont relevé des valeurs de Kc de 0.45-0.50.

RÉPONSE À LA TEMPÉRATURE

Sec mais pas trop chaud : cela pourrait être la devise pour *O. ficus-indica*. Le métabolisme CAM permet à la plante d'atteindre une activité photosynthétique maximale à des températures diurnes de 25°C et des températures nocturnes de 15°C. Des températures diurnes plus élevées ou nocturnes plus basses produisent une diminution nette d'assimilation du carbone, menant à une faible croissance de la plante, une production réduite (Nobel, 2002) et finalement une faible valeur de récolte.

Les températures > 30°C entraînent jusqu'à 70% de réduction de l'activité photosynthétique ; elles affectent la forme du fruit quand elles se produisent durant les premiers stades de sa croissance ; et elles raccourcissent le troisième stade de la croissance du fruit, le stade où se déroule la majeure partie de la croissance de la chaire comestible, menant à une maturation avancée et précoce, et une réduction de calibre, de la fermeté et de la teneur en sucres. Des températures élevées pendant le développement du fruit augmente sa sensibilité aux basses températures (< 8°C) pendant le stockage post-récolte (Inglese *et al.*, 2002b). Par contre, des températures journalières < 15°C ralentissent la croissance du fruit, retardent sa maturation et engendrent une pelure plus épaisse, une plus faible teneur en solides solubles et une mauvaise couleur de peau (Inglese, 1995; Liguori *et al.*, 2006; Nerd *et al.*, 1991a). Les températures < 0°C, même pendant 4 heures, produisent des dommages irréversibles sur les tissus des cladodes et des fruits. Les températures élevées sont une contrainte

majeure pour la production de fruits de bonne qualité dans les zones à été chaud et sec. En fait, la température journalière optimale pour l'assimilation de CO₂ décroît de 17°C dans des conditions humides à 14°C après 7 semaines de sécheresse (Nobel, 2002). Le nombre de jours requis pour atteindre la maturité commerciale de récolte varie selon le moment de floraison et selon les températures dominantes pendant la période de développement du fruit, mais le temps thermique mesuré en degrés-heures de croissance (DHC) de la floraison à la récolte ne varie pas (40-43 x 103) (Inglese *et al.*, 1999 ; Liguori *et al.*, 2006). Nerd et Mizrahi (1995a) ont trouvé que des cladodes détachés qui ont subi de faibles températures hivernales produisent le plus de bourgeons fructifères au printemps suivant. Des résultats similaires ont été rapportés par Gutterman (1995), qui a examiné 18 combinaisons de lumière/température sur des cladodes détachés et a trouvé que les cladodes détachés produisent significativement plus de fruits quand ils sont cultivés en extérieur avec 8 heures de lumière et des températures fraîches qu'en serres chauffées avec 8 heures de lumière. Nobel et Castañeda (1998) indiquent une augmentation de la production de fruits sur des cladodes détachés maintenus à 15/5°C en comparaison avec des cladodes laissés à 25/15°C (températures jour/nuit).

Potgieter et Smith (2006) signalent une forte influence environnementale sur le rendement en fruits, avec le meilleur rendement fruitier obtenu dans les zones d'Afrique du Sud avec des étés chauds et des hivers froids. Ils font aussi état d'une forte interaction génotype x environnement, indiquant une variation dans la plasticité des cultivars en termes de besoins en température pour une production fruitière optimale. Pourtant le figuier de barbarie produit des fruits dans la vallée de Catamarca au nord-ouest de l'Argentine et dans les îles Canaries, où le cumul des unités de vernalisation hivernale ne dépasse pas 100 ; il est aussi capable de refleurir plusieurs fois dans la même saison - naturellement dans le cas du Chili ou de la Californie, induit artificiellement dans le cas de l'Italie ou d'Israël (Inglese, 1995 ; Liguori *et al.*, 2006). Ces floraisons hors saison semblent n'avoir aucune relation avec l'endodormance ; la période de repos peut être le résultat d'une écodormance au lieu d'un vrai repos ou d'une endodormance. Pour *O. ficus-indica*, une autre vague de fruits peut remplacer la première vague printanière de fleurs et de cladodes (Inglese *et al.*, 2002b). La température affecte l'aptitude de la plante à refleurir. En fait, la réponse de la plante à la suppression de la floraison de printemps (SFP) est grandement affectée par les températures dominantes au moment de la suppression (Barbera *et al.*, 1991; Brutsch et Scott, 1991; Nieddu et Spano, 1992). Les températures élevées (> 30/20°C jour/nuit) produisent plus de nouveaux cladodes que de fruits ; d'un autre côté, de plus faibles températures (< 20/15°C jour/nuit), peuvent ne pas résulter en un nouveau bourgeonnement.



RÉPONSE À LA LUMIÈRE

Les fruits d'*O. ficus-indica* ne croissent généralement pas sur les cladodes ombragés (García de Cortázar et Nobel, 1992), probablement parce que dans de telles conditions les cladodes n'accumulent pas le poids sec suffisant pour supporter le développement reproductif. Le taux d'assimilation nette des cladodes d'*O. ficus-indica* devient négatif pour un total de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) journalier de 5 mol m⁻² jour⁻¹ et atteint 90% du maximum à 20 mol m⁻² jour⁻¹ (Nobel, 1988). L'ombrage affecte l'évocation florale comme cela a clairement été démontré par Cicala *et al.*, (1997) et Deidda *et al.* (1992). Au moins 80% de la floraison semble être inhibée si la lumière est supprimée durant les 2 mois précédant la floraison - une indication que l'évocation florale se produit peu de temps avant la floraison. Une intensité lumineuse suffisante pendant la période de repos hivernal est donc essentielle pour une floraison normale. L'application d'ombrage dans les 5 jours après la suppression de la floraison de printemps inhibe aussi le retour d'une nouvelle floraison (Barberas *et al.*, 1993a).

L'ombrage affecte aussi la qualité du fruit, en fonction de l'importance de l'ombrage et des échanges de sucrose au sein de l'arbre. Ombrager complètement la source principale de photo-assimilats du fruit durant 45-75 jours après la floraison n'a aucune influence sur le poids, la qualité ou le moment de maturation du fruit. D'autre part, une courte période (15 jours) d'ombre imposée pendant les premiers stades de croissance du fruit affecte significativement le poids du fruit mais pas la teneur totale en solides solubles ou la fermeté du fruit et le moment de sa maturation. Les fruits ne retrouvent pas entièrement l'état pour une croissance maximale, et ce même quand le cladode fructifère est ombragé pendant une courte période avant la floraison. Comme avec d'autres arbres fruitiers, tels que le pêcher et le pommier, le calibre du fruit à la récolte semble être lié au taux de croissance atteint durant les premiers stades de son développement. A ces stades, la fourniture de photo-assimilats du cladode fructifère devient cruciale pour soutenir la croissance du fruit, probablement à cause de la compétitivité de la demande des différents puits végétatifs et reproductifs en croissance active (Inglese *et al.*, 1999).

Cela est cohérent avec le fait que l'éclaircissage est plus efficace pour augmenter la taille du fruit quand il est appliqué au plus tard 3 semaines après la floraison (Inglese *et al.*, 1995a). Puisque l'assimilation nette des cladodes fortement ombragés est négligeable, la croissance du fruit sur les cladodes ombragés pendant de longues périodes pendant la stade de développement du fruit doit dépendre du transfert important des photosynthétats depuis des branches non ombragées (Inglese *et al.*, 1994b; Luo and Nobel, 1993). Cette mobilisation de glucides de stock fait que la croissance

du fruit est seulement partiellement dépendante de la réduction de la densité du flux de photons photosynthétiques (DFPP) - de longueur d'onde de 400-700 nm - au niveau de la canopée fruitière. La maturation du fruit sur les cladodes ombragés se produit plus tardivement que sur ceux ensoleillés. Le comportement de distribution de la DFPP au sein de la canopée augmente la variabilité de la qualité des fruits en termes de taille et les fruits situés dans la partie inférieure de la canopée sont plus petits que ceux au sommet. La maturation du fruit varie au sein de la plante et du cladode fructifère, principalement à cause des différentes évolutions temporelles de la formation des bourgeons floraux, de leur développement et de la floraison (Barbera et Inglese, 1993). Le comportement de la distribution de la DFPP au sein de la canopée augmente cette variabilité, puisque l'ombre retarde la maturation des fruits selon la longueur de la période d'ombrage.

En conclusion, la large variabilité au sein de l'arbre de la qualité des fruits et du moment de maturation qui se produit chez le figuier de Barbarie (Barbera et Inglese, 1993) peut partiellement être expliquée en termes de distribution de la DFPP au sein de la canopée.

BIOLOGIE DE LA REPRODUCTION

La production de fruits par *O. ficus-indica* est extrêmement variable. Des rendements de 20-30 tonnes ha⁻¹ ont été rapportés en Israël et en Italie (Barbera et Inglese, 1993; Nerd et Mizrahi, 1993) et de 10-30 tonnes ha⁻¹ en Afrique du Sud (Wessels, 1988a; Brutsch et Zimmerman, 1993). La large variabilité des rendements dépend de la conception du verger (écart entre plantes), des pratiques culturales, des conditions environnementales et de la fertilité des cultivars. Les plantes commencent à produire 2-3 ans après la plantation ; elles atteignent leur potentiel maximum 6-8 ans après la plantation et restent productives durant 25-30 ans et même plus, en fonction de la taille et de la gestion générale du verger.

Fertilité du cladode

Pour une plante mature, la plupart (80-90%) des cladodes d'un an portent des fruits, représentant 90% du rendement annuel. Cependant il y a une large variabilité de fertilité qui dépend de l'âge de la plante, des conditions environnementales et de leur état de croissance. Le nombre moyen de fleurs produites par un cladode single et d'un an est de 6-9, avec des pics de 30-35 fleurs. Les cladodes de deux ans sont généralement responsables du renouvellement végétatif et une petite proportion (10-30%) produit des fruits mais d'une fertilité réduite par rapport aux cladodes d'un an. Le nombre annuel de cladodes fructifères sur une plante dépend de l'écart entre plantes et varie de 100-120 pour 350-400 plantes ha⁻¹ à 20-30 pour 1000-1200 plantes ha⁻¹. Un figuier de Barbarie mature *O. ficus-indica* (L.) Mill. produit de nouveaux fruits et cladodes avec



un ratio de 4 : 1 tous les ans (Barbera et Inglese, 1993). La fertilité des cladodes est liée au poids sec accumulé par unité de surface (García de Cortázar et Nobel, 1992). Les cladodes deviennent productifs quand leur poids sec estimé (PSE) excède le poids sec minimum pour une surface donnée d'au moins 33 g. Les valeurs de PSE deviennent positives après 60-70 jours de développement du cladode et atteignent, en novembre, 13.1 ± 2.4 g et 10.6 ± 1.2 g pour, respectivement, les cladodes de printemps et celles de la seconde floraison de la précédente saison.

Les bourgeons floraux émergent au court du printemps (Pimienta Barrios, 1990; Gutterman, 1995; Nerd et Mizrahi, 1995a). La photopériode et/ou les faibles températures hivernales peuvent être le signal environnemental pour une telle initiation florale. De plus, les nutriments peuvent aussi affecter l'initiation, puisque la fertilisation azotée des plantes (en utilisant du nitrate d'ammonium) peut augmenter le nombre de bourgeons floraux par plante (Nerd et al., 1993a). La plupart des fleurs se développent sur des cladodes terminaux d'un an et les nouveaux cladodes apparaissent habituellement sur les cladodes de deux ans ou plus (Inglese et al., 1994a). Les bourgeons végétatifs et reproductifs apparaissent simultanément au printemps ou au début de l'été quand les bourgeons de printemps sont retirés pour induire une reffloraison (Barbera et al., 1991). Les fleurs se développent généralement des aréoles disposées le long de la couronne du cladode mais la production de fleurs au niveau des aréoles de la surface plane exposée au soleil n'est pas rare. Un cladode peut produire 25-40 fleurs ; pendant des floraisons abondantes dans des conditions de haut potentiel d'évapotranspiration, chacune peut perdre jusqu'à 3g d'eau par jour, ce qui équivaut à 15% de son poids au moment de l'anthèse (De la Barrera et Nobel, 2004).

Biologie florale

Les bourgeons floraux se développent rapidement, commençant avec un méristème couvert de trichomes pluricellulaires au-dessus de la cicatrice du pétiole (Nieddu et Spano, 1992). Quand le bourgeon floral atteint la longueur de 0.5 cm (Wessels et Swart, 1990), le gynécée et l'androcée sont visibles à l'intérieur. L'ovaire, qui est infère et uniloculaire, est multicarpelle (6-12 carpelles, généralement 8 croissant ensemble à la base et se séparant au niveau de la région stigmatique) (Nieddu et Spano, 1992). Les étamines différencient deux thèques comportant chacune deux sacs polliniques ; une autre déhiscence a lieu avant l'anthèse (Nieddu et Spano, 1992). Le pollen se présente sous une forme sphérique, apolaire radio-symétrique avec une surface réticulée et poly-panto-porée avec un périmètre circulaire polygonal (6-8 côtés) (El Behi et al., 2015).

Aguilar et Chavez (1995) ont rapporté que l'hormone acide gibbérellique (AG) favorisait le développement de bourgeons floraux et que l'acide indole-butyrique (AIB)

stimulait le bourgeonnement végétatif. Dans les régions subtropicales, les bourgeons floraux d'*Opuntia* commencent quand la température mensuelle moyenne excède 16°C - en mars ou avril dans l'hémisphère nord et en septembre ou octobre dans l'hémisphère sud (Nerd et Mizrahi, 1995). La période de production de bourgeons floraux fluctue entre 3 et 5 semaines (Reyes Agüero et al., 2006). Le développement floral, du bourgeon à l'anthèse, nécessite 21 à 47 jours mais peut durer jusqu'à 75 jours (Wessels et Swart, 1990). Généralement, dans l'hémisphère nord, l'anthèse a lieu entre mai et juin et dans l'hémisphère sud, entre février et août (Reyes Agüero et al., 2006). Les fleurs sont principalement hermaphrodites. Les pollinisations autogames et allogames peuvent se produire chez *O. ficus-indica* (Nerd et Mizrahi, 1995a). Différentes espèces d'abeilles visitent les fleurs d'*Opuntia* pendant la pollinisation.

L'apomixie est fréquente chez les *Opuntia* (Pimienta Barrios, 1990; Mondragón et Pimienta Barrios, 1995). Gil et Espinoza (1980) ont obtenu des fruits parthénocarpiques de taille normale contenant des graines vides à partir de fleurs fécondées traitées à la gibbérelline et à l'auxine avant l'anthèse mais pour certains clones d'*Opuntia*, la pollinisation n'est pas nécessaire pour obtenir des figues de Barbarie sans graines. En fait, Weiss et al. (1993b) ont constaté la parthénocarpie végétative sur quelques clones d'*Opuntia ficus-indica* (L.).

El Behi et al. (2015), dans une étude du cultivar sans graines 'Bianca' d'un germoplasme Sicilien, ont formulé l'hypothèse que cette absence de graines pouvait être basée sur une sténospermocarpie partielle, comme il a été rapporté pour le raisin et les *Citrus* (Vardi et al., 2008). Les fruits d'*Opuntia* sont uniloculaires et polyspermiques. Chez *Opuntia ficus-indica*, la peau verte non mûre a une activité stomatique et photosynthétique, contribuant à 8-10% de la croissance du fruit (Inglese et al., 1994b). Les aréoles des fruits ont toujours des glochides et peuvent avoir des épines et des soies ou poils, qui peuvent persister après le stade de fleur (Bravo, 1978).

La croissance des graines et leur maturation a lieu 30-70 jours après l'anthèse ; les graines sont petites et ovoïdes ou en forme de lentilles (Bravo, 1978). Les cultivars italiens d'*Opuntia ficus-indica* ont une moyenne de 273 graines par fruit, dont 146 sont normales et 127 sont stériles (Barbera et al., 1991) ; les cultivars israéliens ont une moyenne de 268 graines normales par fruit (140-430) (Nerd et Mizrahi, 1995a) et les cultivars mexicains ont une moyenne de 203 graines normales par fruit (10-448) (Reyes Agüero et al., 2006).

Croissance du fruit

La croissance du fruit, en terme de poids frais, suit une courbe sigmoïde double; Au cours de la période de développement du fruit (PDF), il y a un gain prononcé de poids sec de la peau pendant le stade I, celui des graines pendant le stade II et celui de cœur durant le



stade III (Barbera *et al.*, 1992b ; Nerd et Mizrahi, 1997). La croissance des fruits et des jeunes cladodes implique un transport substantiel des glucides stockés dans les cladodes basaux (Luo et Nobel, 1993; Inglese *et al.*, 1994b). En fait, quand plus de cinq fruits se développent sur un cladode fructifère d'un an, une importation considérable d'assimilats se produit, particulièrement pendant le stade III de la croissance du fruit (Inglese *et al.*, 1994b).

Inglese *et al.* (1994b) et Luo et Nobel (1993) ont étudié la relation source-puits de plantes fructifères matures et ont trouvé un flux massif d'assimilats carbonés entre les cladodes de différents âges. Les jeunes cladodes en développement semblent être en compétition avec les fruits - comme indiqué par leur taux de croissance absolu (TCA) plus élevé. Cependant, ils deviennent une source de glucides à un stade précoce de leur développement (Luo et Nobel, 1993), un moment qui coïncide avec le développement des fleurs ou avec le tout premier stade de la PDF. La force relative du puits change en fonction des stades de développement de la croissance saisonnière des fruits et des cladodes (Inglese *et al.*, 1999). Les fruits deviennent le puits principal durant le stade III - comme cela a été indiqué par la nette réduction du TCA du cladode à ce stade.

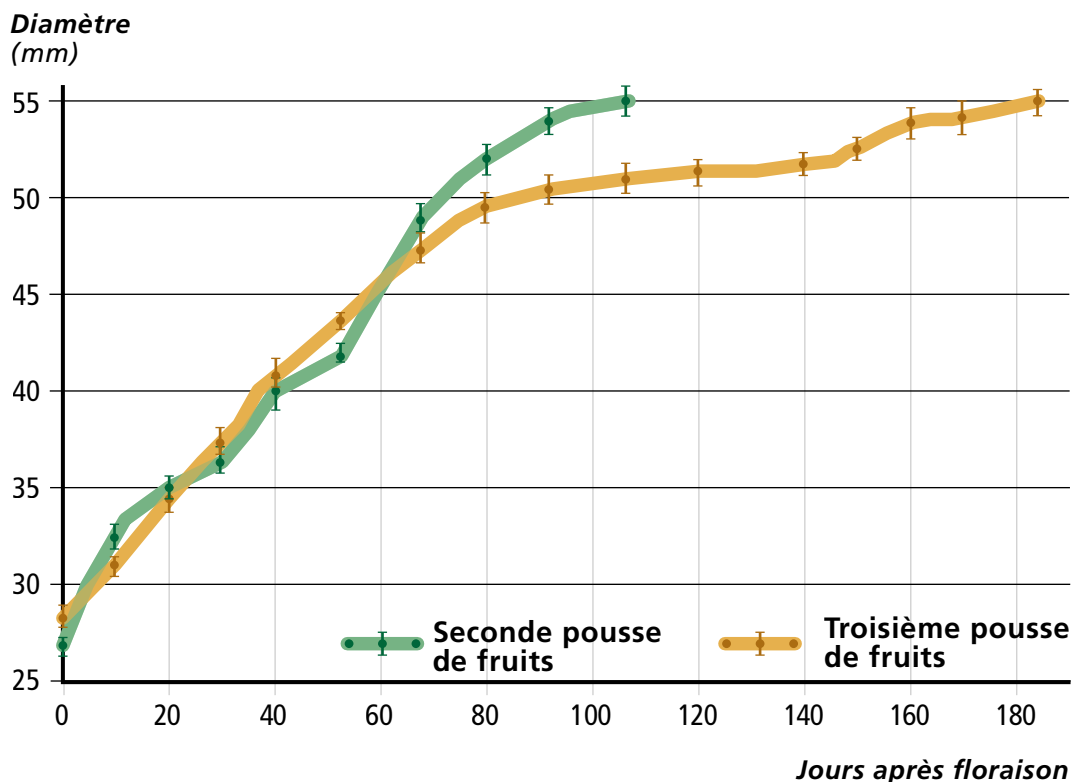
La compétition entre la croissance du fruit et du cladode, ainsi que la réduction du nombre de nouveaux cladodes après la SFP, peuvent être à

l'origine de comportement de fructification alternée des plantes qui varie aussi selon le génotype (Ingleses *et al.*, 2002b). L'alternance de la fructification du figuier de Barbarie dépend de la réduction des cladodes fertiles après une activité végétative faible l'année précédente. Le nombre de fleurs par cladode fertile devient de plus en plus stable chaque année ; il dépend de l'âge du cladode et est le plus élevé sur les cladodes d'un an. La taille du fruit varie entre les arbres et dépend de facteurs tels que l'architecture de la plante et le rendement de récolte par plante et par cladode.

Récolte hors saison

L'outil le plus puissant pour obtenir une plus longue saison de mise en marché des fruits est la capacité des cladodes à reflorir plusieurs fois au cours de la même saison, soit naturellement soit après l'application de pratiques d'induction (Nerd et Mizrahi, 1997). La double floraison se produit naturellement dans la zone de Salinas en Californie où les fruits sont récoltés de septembre à mars (Inglese, 1995) et dans la région centrale du Chili où la récolte des fruits dure de février à avril et de juillet à septembre (Sudzuki Hills *et al.*, 1993). En Italie, une seconde floraison est obtenue du fait de la suppression totale des fleurs et des cladodes de la pousse printanière. La SFP a lieu quand la floraison principale se produit, dans l'hémisphère nord entre la fin de mai et la dernière semaine de juin

Figure 3
Courbe de croissance cumulée pour les fruits d'*O. ficus-indica* cv. 'Gialla' venant de la 2nde et 3^{ème} pousse de fleurs



et en octobre dans l'hémisphère sud (Inglese, 1995). De nouveaux bourgeons floraux se développent sur les cladodes fertiles de la pousse naturelle et l'index de re-floraison - défini comme le ratio les fleurs de la seconde pousse / les fleurs de la première - est plus élevé pour des cladodes avec une fertilité naturelle de 5-10 fleurs, il diminue nettement avec chaque fleur additionnelle qui se développe pendant la première pousse. Le moment de la suppression affecte le taux de re-floraison du cladode (Barbera *et al.*, 1991; Brutsch et Scott, 1991). Par exemple, l'ablation des fleurs au stade de préfloraison engendre le plus haut taux de re-floraison, alors que la suppression de la pousse de printemps après la chute des pétales réduit la re-floraison jusqu'à 50-70% (Barbera *et al.*, 1991; Inglese *et al.*, 1998). Cette diminution de la re-floraison qui se produit quand les fleurs sont supprimées à pleine floraison ou après la chute des pétales est liée à un effet inhibiteur, sur l'initiation des bourgeons floraux, (Barbera *et al.*, 1993 a) de l'AG3 diffusé depuis la fleur vers le cladode père (Inglese *et al.*, 1998). En effet Barbera *et al.* (1993a) ont démontré que l'AG 3 appliqué dans les 6 jours après la SFP inhibe totalement la re-floraison - ce qui indique que le bourgeon floral, induit le printemps précédent, est encore réversible à ce stade. Les cladodes en développement, la saison en cours, inhibent aussi la re-floraison s'ils ne sont pas entièrement retirés (Inglese *et al.*, 1994a). Les fruits afférents à la préfloraison ont la période de développement du fruit la plus courte et mûrissent 15-20 jours plus tôt que ceux de pleine floraison et 30-40 jours plus tôt que les fruits de post-floraison.

Le taux de re-floraison dépend aussi des conditions environnementales dominantes au moment de la suppression (principalement la teneur en eau du sol et la température de l'air). En effet, l'importance de la re-floraison diffère grandement d'année en année et dépend de la situation géographique du verger (Barbera *et al.*, 1991; Brutsch et Scott, 1991; Nieddu et Spano, 1992). Des hautes températures pendant l'initiation du bourgeon induit une activité végétative plutôt que reproductive, donnant lieu à un plus faible taux de re-floraison. Liguori *et al.* (2006) ont développé une stratégie basée sur le potentiel de la plante à refleurir même après une double suppression de la pousse de printemps : la première, au début de juin, avec la suppression de la pousse de printemps et la seconde, à la fin de juin, avec la suppression de la seconde pousse induite. Le taux de cette seconde re-floraison (troisième pousse) est très irrégulier, variant de 25 à 40%. La plante fleurit durant les 10 premiers jours d'août et les fruits mûrissent de décembre à mars en fonction du temps de couverture et des conditions environnementales. La longueur de la période de développement du fruit augmente de 100-120 jours à 160-190 jours pour la récolte hors saison d'hiver, à cause d'un troisième stade de croissance du fruit plus long qui se produit quand les températures sont en dessous des valeurs optimales pour la croissance du fruit (**Figure 3**). Cependant, les températures

d'hiver inhibent la croissance et la maturation du fruit ; il est donc nécessaire de couvrir les plantes avec des tunnels en PVC pour créer les conditions appropriées pour un développement régulier du fruit. La production d'hiver des fruits se fait en plein champ en Israël (Nerd *et al.*, 1993a). Dans ce cas, la seconde récolte suit la récolte principale et se fait sur les cladodes de l'année développés depuis mai. Après la première récolte, une seconde floraison est induite grâce à une fertilisation azotée importante et à l'irrigation. La seconde floraison a lieu en septembre-octobre et le fruit se développe de janvier à mars. Les fruits ont une taille régulière mais une proportion de chair réduite (50-55%).

PRODUCTIVITÉ DE BIOMASSE

Des densités élevées de plantation mènent à une accumulation de matière sèche extrêmement élevée au cours de la croissance végétative mais affecte profondément l'allocation des ressources vers le fruit (García de Cortázar et Nobel, 1992). *O. ficus-indica* peut avoir une productivité annuelle de matière sèche qui excède celle de presque toutes les espèces cultivées de C_3 et C_4 . Par exemple, une productivité de 47 tonnes de matière sèche (MS) $ha^{-1} an^{-1}$ de cladodes (99%) et de fruits (1%) a été prédite pour des plantations à forte densité (24 plantes m^{-2}) alors qu'une productivité de presque 15 tonnes ha^{-1} a été mesurée pour un espacement plus grand (0.24 plante m^{-2}), donnant une plus faible croissance végétative par rapport à la croissance reproductive, avec une récolte précoce de fruits et un comportement de fructification alterné (García de Cortázar et Nobel, 1992). Acevedo *et al.* (1983) ont mesuré la production de matière sèche d'un cladode à 1 $kg m^{-2}$ de surface de sol et 0.3 kg de fruits $m^{-2} an^{-1}$. Récemment Pinos Rodríguez *et al.* (2010) ont rapporté une production de matière sèche de 1.39 $kg m^{-2}$ pour des *O. ficus-indica* cultivés pour la production de biomasse fraîche pour le bétail. Inglese *et al.* (2012) - dans des plantations commerciales pour la production de fruits avec une densité bien plus faible (333 arbres ha^{-1}) - ont trouvé des valeurs très similaires à celles trouvées par Nobel (1988), mais pour une plus faible biomasse totale et un poids de fruit commercial (1.2 $kg m^{-2}$ de surface de sol, en prenant en compte les premières et deuxièmes pousses de fruits et de cladodes). A la fin de la première saison de croissance, les cladodes de l'année ont presque leur surface définitive, mais ils n'atteignent que 65% du poids sec des cladodes d'un an. Pendant la deuxième année de croissance, ils montrent une augmentation marginale de leur surface mais une accumulation significative de poids sec (+30%). Par la suite, les cladodes se développent seulement et de manière marginale, en termes de surface mais ils continuent à accumuler du poids sec. Le poids sec spécifique élevé des cladodes supports est le double de celui des cladodes d'un an. Les taux de croissance absolu des



cladodes et des fruits peuvent atteindre respectivement 0.12 jour⁻¹ et 0.16 jour⁻¹.

La composante du fruit (indice de récolte [IR]) n'a pas été systématiquement étudiée pour *O. ficus-indica*. García de Cortázar et Nobel (1992) ont montré que la variation annuelle de l'allocation de la matière sèche dans les cladodes ou dans les fruits dépend aussi de la densité de plantation. Une augmentation de la matière sèche allouée aux fruits était accompagnée d'une réduction du nombre de cladode et de l'accumulation de poids sec.

L'interception de la lumière, l'assimilation de CO₂ et la productivité de la plante dépendent de l'architecture de la canopée et l'indice de surface des tiges (IST) par surface de sol (en prenant en compte les deux côtés du cladode pour l'IST) - l'IST est l'équivalent de l'indice de surface foliaire (LAI pour « leaf area index ») (Nobel, 1988). Malgré leur importance, les valeurs d'IST pour les vergers d'*O. ficus-indica* ont été peu étudiées. Des valeurs d'IST de 6.5-8.5 ont été mesurées, considérant tous les cladodes de la canopée et la surface couverte par la canopée de l'arbre. Une productivité maximale (2 kg MS m⁻² de surface de sol an⁻¹) a été prédite pour des IST = 4-6 ; alors que pour un IST < 3, avec 20 000 et 6000 plantes ha⁻¹, l'assimilation nette totale de CO₂ est presque linéaire avec l'IST (Nobel, 1988). Ces calculs incluent tous les cladodes ; ils ne prennent pas en compte que la contribution d'un cladode à l'assimilation du CO₂ change avec l'âge du cladode (Nobel, 1988), ni qu'une définition optimale de l'IST doit inclure la qualité des fruits qui dépend aussi de l'interception des PAR par les cladodes porteurs (Inglese *et al.*, 1999). Par exemple, les éléments de la canopée photosynthétiquement actif d'un verger commercial pour la production de fruits avec 420 arbres ha⁻¹ (Liguori *et al.*, 2013a) constituent 60% de la surface de la canopée, avec un IST de verger = 2.6 et un IST d'arbre = 4.0 - c'est-à-dire des valeurs bien en dessous de celles rapportées par Nobel (1988). Dans ces conditions, l'IR était d'environ 29%, en considérant ensemble la première et la seconde pousse, ou de 26% si seulement la croissance végétative et reproductrice de la seconde pousse sont prises en compte. Les rayonnements solaires (40%) sont interceptés par les cladodes les moins photosynthétiquement efficaces et par les supports lignifiés. Le stock de carbone dans les composants de la canopée et des racines montre qu'une plante mature peut avoir 9-10 fruits m⁻² de surface de cladode (des cladodes de l'année à celles de 2 ans), ce qui représente 1.1-1.4 kg de fruits m⁻². Un verger commercial pour la production de fruits peut accumuler 7.5 tonnes de MS ha⁻¹ an⁻¹, ce qui correspond à 3.4 tonnes de C ha⁻¹ stockés dans les éléments de la canopée (y compris les fruits). Ces valeurs sont similaires à celles rapportées pour les vergers décidus (par exemple : pêcher) et pour les vergers persistants (par exemple : oranger) (Tagliavini *et al.*, 2008).

RÉPONSES POTENTIELLES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les activités agricoles, de transport et industrielles qui dépendent des énergies fossiles émettent des gaz à effet de serre, principalement du CO₂. En effet, en à peine 150 ans, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone a rapidement augmenté depuis le niveau préindustriel de 280 ppm jusqu'au niveau actuel de 400 ppm (IPCC, 2014). A son tour, l'augmentation du CO₂ mène à des taux de photosynthèse plus élevés en conséquence d'un gradient de concentration plus prononcé entre l'atmosphère et les sites de carboxylation dans les tissus des plantes. Aussi, étant donné qu'une pression partielle plus élevée mène à une diminution de la « demande » de carbone par les feuilles, une réduction de la conductance stomatique est observée chez les plantes exposées à un taux élevé de CO₂ (Smith *et al.*, 2009). Malgré leur mécanisme inhérent de concentration de CO₂, qui pourrait rendre les plantes CAM insensibles à de plus hautes concentrations atmosphériques de ce gaz, un réel effet fertilisant a été observé. C'est le cas pour *O. ficus-indica* exposé à une double concentration de CO₂, soit dans une chambre environnementale contrôlée soit chez des plantes enracinées gardées dans des compartiments à toit ouvert. En particulier, les plantes accumulent 20-40% plus de poids sec avec la double concentration CO₂ qu'avec 350 ppm (Nobel et García de Cortázar, 1991; Nobel et Israel, 1994). De plus, le développement de la plante est amélioré par la fertilisation carbonée. Par exemple, un doublement de la production de cladodes fils de second ordre est observé après trois mois d'exposition des cladodes matures à une concentration élevée de CO₂ (Nobel et Israel, 1994). De plus, l'élongation des racines peut s'accroître jusqu'à 25% sous une concentration de CO₂ élevée avec une température optimale de l'air de 30°C en moyenne (Drennan et Nobel, 1998). Ces effets de fertilisation peuvent être conduits par des réponses anatomiques d'*O. ficus-indica*, telle qu'un chlorenchyme qui devient 31% plus épais avec une concentration double de CO₂ qu'avec une concentration ambiante, et ce malgré une diminution, de 20%, de la fréquence de stomates et un épaississement, de 30%, de la cuticule qui a plus de cire épicuticulaire (North *et al.*, 1995). Cet effet de fertilisation résultant de l'exposition à une concentration de CO₂ élevée a aussi été observé chez d'autres cactus (par exemple : l'hémiépiphyte *Hylocereus undatus*). Pour cette culture tropicale, cultivée dans plus de 20 pays, le taux de photosynthèse augmente de 34% avec une concentration double de CO₂ (Raveh *et al.*, 1995; Nobel et De la Barrera, 2004). Cependant, de hautes concentrations de CO₂ peuvent aussi mener à de plus faible taux de respiration, à une réduction de l'activité maximale du Cytochrome c Oxydase et à un nombre plus faible de mitochondries chez des individus d'*O. ficus-indica* (Gomez Casanovas *et al.*, 2007). Donc, alors



qu'une augmentation de la concentration de CO₂ peut améliorer la productivité des plantes, cela ne pourrait être vrai que jusqu'à un certain seuil à partir duquel le métabolisme de la plante sera réduit.

En plus de l'effet direct sur la physiologie et l'anatomie de la plante, des concentrations élevées de gaz à effet de serre vont probablement impacter la productivité des plantes en changeant substantiellement le climat de la planète. A ce sujet, quatre scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont proposés par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) qui pourraient mener, pendant ce siècle, à différentes conséquences sur le climat (**Tableau 2**). Ces scénarios RCP (de l'anglais Representative Concentration Pathways ou Profils représentatifs d'évolution de concentration) mènent à une certaine augmentation du forçage radiatif par rapport à celui de 1750 et diffèrent des précédents scénarios d'émissions (A1, B1, A2, B2) dans lesquels ils considèrent explicitement les politiques internationales de développement et environnementales (ICPP, 2014).

- RCP2.6 est le scénario le plus optimiste. Sans équivalent précédemment considéré par le GIEC, RCP2.6 repose sur des politiques strictes d'atténuation qui résulteraient en un retrait net de gaz à effet de serre de l'atmosphère et pourrait mener à une élévation de la température globale de ≤ 2°C par rapport au climat préindustriel.
- RCP4.5 et RCP6.0 sont des scénarios d'émissions intermédiaires et plausibles. Leurs équivalents précédents dans les scénarios du GIEC sont ceux de la famille B, qui considèrent l'adoption de technologies vertes avec une conséquente réduction de la dépendance aux énergies fossiles, même avec des différences de degré de coopération internationale.
- RCP8.5 est le scénario le plus extrême, qui suppose que malgré les objectifs de réduction et les accords internationaux, le monde va continuer à dépendre fortement des énergies fossiles.

L'étendue du changement environnemental qui se produit au cours de ce siècle dépend du respect

des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre acceptés, en 2015, par la plupart des pays, dont les deux plus grands contributeurs : les Etats Unis d'Amérique et la Chine.

Ce changement climatique imminent va probablement être préjudiciable pour la productivité globale de l'agriculture (Monterroso Rivas *et al.*, 2011; Lobell et Gourdjji, 2012; IPCC, 2014; Ovalle Rivera *et al.*, 2015). Cependant, pour certaines plantes CAM cultivées, les nouvelles conditions environnementales peuvent donner lieu à une augmentation des zones adaptées à leur culture (García Moya *et al.*, 2010; Lobell et Goudji, 2012). Naturellement, une adaptation majeure des plantes CAM à un environnement plus chaud et souvent plus sec est que les échanges gazeux se produisent la nuit quand la température de l'air est plus faible. De plus, la productivité des plantes CAM est principalement régie par la température nocturne de l'air (quand les échanges gazeux se font), plus que par les températures diurnes (quand les stomates sont fermés) (Andrade *et al.*, 2007). Dans la plupart des cas, la température nocturne moyenne menant à l'assimilation maximale de CO₂ par les plantes CAM varie de 10 à 20 °C (Nobel, 1988). Donc, tant que la température nocturne de l'air est appropriée, une assimilation substantielle de CO₂ peut avoir lieu même avec des températures diurnes qui augmentent. En effet, étant donné l'augmentation attendue de la productivité potentielle de diverses variétés d'Agave dans les régions tropicales et subtropicales de l'hémisphère ouest, leur culture a été proposée pour la séquestration de carbone, l'atténuation de l'érosion des sols et la production de biomasse pour l'utilisation en biocarburants (García Moya *et al.*, 2010).

De plus hautes températures de l'air pourraient aussi être similairement avantageuses pour les cactus cultivés. Par exemple, bien que la température nocturne moyenne de l'air engendrant des échanges gazeux maximum pour *O. ficus-indica*, soit d'environ 12°C, cette plante est capable de fonctionner adéquatement dans une large gamme de conditions ; en effet, au moins 80% de l'assi-

TABLEAU 2 Les RCP considérés dans les modèles de changement climatique global

RCP	Équivalent précédent scénario du GIEC	Emissions Gaz à effet de serre	Année 2100 (CO ₂ -eq.) (ppm)	Forçage radiatif par rapport à 1750 (W m ⁻²)	Augmentation de la température (°C)
RCP4.5	B1	Atténuation rigoureuse	430-480	2.6	< 1.5
RCP6.0	B2	Intermédiaires	580-720	4.6	2-3
RCP2.6	n/a	Intermédiaires	720-1 000	6.0	3-4
RCP8.5	A2/A1FI	Très grandes	> 1 000	8.5	> 4

Source: GIEC (2014).

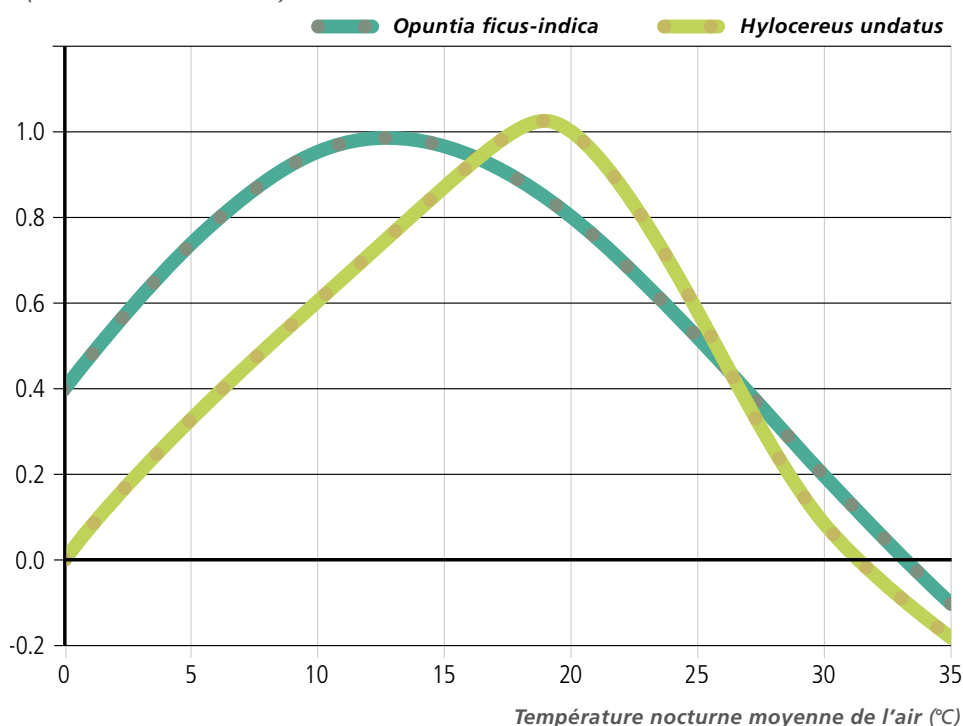
milation maximale de CO_2 peut être réalisée entre 6 et 20°C (**Figure 4** ; Nobel, 1988 ; Nobel et al., 2002). Le cas d'*Hylocereus undatus* est légèrement différent. Pour cette culture tropicale, une température de l'air plus élevée va mener à plus de zones de culture potentielles, puisque la température optimale pour l'assimilation de CO_2 est approximativement 20°C (**Figure 4** ; Nobel et al., 2002). Cependant, la fourchette de températures nocturnes de l'air menant à un taux d'échanges gazeux élevé est relativement étroite pour cette plante, surtout si on la compare à *O. ficus-indica*, puisqu'une température nocturne moyenne de l'air entre 14 et 23°C est requise pour atteindre au moins 80% de l'assimilation maximale de CO_2 (**Figure 4** ; Nobel et al., 2002).

Les changements moyens de la température ambiante vont déterminer la productivité moyenne des cultures, y compris pour les cultures de cactus telles que *O. ficus-indica* et *H. undatus*. Cependant, la vitesse de réchauffement et la sévérité des événements météorologiques extrêmes - c'est-à-dire les vagues de chaleur occasionnelles, les gelées, les sécheresses ou les fortes pluies inhabituelles qui vont probablement devenir plus fréquentes et sévères, à cause du changement climatique - vont déterminer la survie des plantes et les limites de la culture de la plante (IPCC, 2014 ; Nobel, 1988). Qu'une espèce de plante soit capable de faire face à des épisodes de hautes températures de plus en plus fréquents

dépend de sa tolérance à la température. Pour 18 espèces de cactus, la température haute est létale à environ 57°C (Nobel, 1988 ; Drennan, 2009). *O. ficus-indica* peut généralement survivre à l'exposition à des températures allant jusqu'à 66°C, alors que *H. undatus* peut seulement résister jusqu'à 55°C - la plus basse tolérance de haute température mesurée pour un cactus (Drennan, 2009 ; Nobel et al., 2002). Pour beaucoup d'espèces, la réelle de température est déterminée par la température moyenne dominante de l'air. En effet, une augmentation de 10°C de la température de l'air auquel les plantes sont exposées mène à une augmentation moyenne de 5.3°C pour la température létale de 18 espèces de cactus (Nobel, 1988 ; Drennan, 2009). Par exemple, pour des individus d'*O. ficus-indica* incubés à une température moyenne de 35°C, la température létale est de 62°C, mais pour des plantes incubées à 45°C, la température létale est 66°C ; donc l'acclimatation de cette espèce est de 4.2°C pour 10°C d'augmentation de la température de l'air (Nobel, 1988 ; Nobel et al., 2002). Par contre, l'aptitude d'acclimatation d'*H. undatus* est la plus faible mesurée pour un cactus. Pour cette liane néotropicale, une augmentation de la température moyenne de l'air de 20 à 30°C améliore la tolérance aux hautes températures à peine de 54.0 à 55.4°C ; en plus, des température moyennes plus élevées mènent à une inhibition des échanges gazeux voire la mort de la plante (Nobel et al., 2002).

Figure 4
Réponses de l'assimilation journalière nette totale de CO_2 par les cultures de cactus *Opuntia ficus-indica* et *Hylocereus undatus* aux températures nocturnes moyennes de l'air

Assimilation journalière nette de CO_2 par unité de surface de tige (fraction du maximum)



05

Ressources génétiques du Nopal (*Opuntia* spp.)

Candelario Mondragón Jacobo^a et Innocenza Chessa^b

^a Université Autonome de Querétaro, Juriquilla Querétaro, Mexique

^b Université de Sassari, Italie



INTRODUCTION

Les prédictions pour la population mondiale en 2050 sont peu réjouissantes, on estime, avec le taux de natalité actuel, qu'elle atteindra 9 milliards. Quelques-unes des populations ayant les plus fortes croissances se trouvent dans des pays des zones arides et semi-arides ; elles sont aussi dans les régions les plus sèches du monde et l'eau va être deux fois plus rare d'ici 2050 (UN-DESA, 2015). Le changement climatique va aussi affecter la surface de terres qui se trouveront dans des conditions semi-arides. Les populations augmentent le plus rapidement dans les régions où il est le plus difficile de produire de la nourriture. Pour cette raison les gouvernements doivent fournir une attention immédiate et continue aux effets du changement climatique, que leurs pays soient potentiellement ou déjà affectés.

Une utilisation efficace de l'eau et de la terre, une sélection réfléchie des espèces cultivées en faisant correspondre les besoins agro-climatiques aux spécificités du site, des stratégies saines pour augmenter les rendements et des génotypes améliorés de plantes et d'animaux, font partie des leviers pour faire face à cette catastrophe. Des plantes indigènes aux usages multiples telles que le figuier de Barbarie (*Opuntia* spp.) peuvent être incluses dans la liste des choix de cultures, étant donné leur tolérance à la sécheresse et leur large gamme d'usages potentiels : en fruit, en fourrage ou en légume, en plus de leur utilisation comme clôture vivante pour protéger les maisons et les familles dans les régions sèches ou pour le contrôle de l'érosion (Mondragón Jacobo et Chessa, 2013). Les ressources de germoplasmes sont destinées à être la pierre angulaire de toutes les futures utilisations du figuier de Barbarie ; une exploration intensive, une conservation *in situ* et *ex situ* efficace, une évaluation dynamique de nouveaux sites et des projets dynamiques d'échanges et d'amélioration sont nécessaires pour comprendre tout le potentiel de cette ressource de valeur. Les scientifiques doivent identifier les caractères à utiliser dans les programmes intensifs de sélection : les anciens et nouveaux caractères utiles pour faire face à la sécheresse, au gel, aux ravageurs et maladies indigènes et étrangères introduites, et pour améliorer le contenu nutritionnel.

Ce chapitre résume les progrès réalisés dans les activités liées au germoplasme dans les pays ayant une très grande variabilité de figuiers de Barbarie, qu'ils soient autochtones ou introduits. Il décrit aussi les bases de l'exploration

des ressources génétiques d'*Opuntia*, la documentation, la conservation *in situ* et *ex situ*, et l'utilisation.

EXPLORATION DES RESSOURCES GÉNÉTIQUES

Avant d'investir du temps et des ressources dans la collecte de germoplasmes de cactus, il est nécessaire de mettre en perspective les chances de trouver une variabilité génétique réelle et utile, les utilisations potentielles et - plus important - le coût à long terme d'entretien d'une collection de germoplasmes. Il est alors impératif de chercher des sources bibliographiques pour comprendre les origines et les voies de dissémination, de manière à vérifier, avant d'entreprendre une collection, le besoin en une étude plus poussée.

Il est bien connu qu'*Opuntia* tire son origine et a été domestiqué au centre du Mexique, un pays qui détient encore la plus large gamme d'espèces et variétés d'*Opuntia* sauvages et domestiques. On sait aussi que durant la période coloniale, le figuier de Barbarie domestiqué a été introduit en Europe et par la suite en Afrique du Nord, principalement dans les pays occupés par l'Espagne, la France et l'Italie. D'autres événements historiques et économiques expliquent la présence, entre le seizième et dix-neuvième siècle, de figuiers de Barbarie au Proche-Orient, en Asie Centrale et dans d'autres parties du monde. Depuis les années 1980, il y a eu des efforts significatifs des gouvernements et des organisations non gouvernementales (ONG) pour limiter les effets de la désertification en Afrique du Nord et dans d'autres zones ; la culture du figuier de Barbarie fait partie des mesures promues pour contrôler l'érosion et stimuler la régénération de la végétation.

Analyse du germoplasme

Pour une exploration fructueuse, il est important de considérer les éléments suivants :

- Des sources de connaissances locales devraient être recherchées concernant la plante, les noms locaux, les formes d'utilisation et l'intégration de la plante dans la culture et l'histoire locale. Il est toujours préférable d'inviter des guides locaux pour être assisté sur le terrain, pas seulement des conseillers, mais aussi des bergers/vachers, des collecteurs de bois et des cueilleurs de fruits et d'herbes, qui sont souvent plus familiers avec la flore locale.

- La connaissance de la phénologie des cactus dans la zone d'intérêt est cruciale, puisque tous les descripteurs sont basés sur les traits visuels relatifs à toutes les parties de la plante ; cependant les racines, les fleurs et les fruits sont essentiels pour une identification botanique précise. Un trait commun utilisé pour identifier les accessions et les variétés est la couleur du fruit, aussi bien interne qu'externe. Cependant la couleur du fruit est un trait dynamique - qui change avec le stade de maturité, alors que la couleur de la pulpe change à la maturation - et pour cette raison l'exploration devrait être conduite par un chef expérimenté qui est moins facilement induit en erreur.
- Une description géographique précise de la zone est indispensable : altitude, exposition à la lumière du soleil et humidité du sol affectent tous le climat, et le climat peut à son tour affecter la saison de maturation. Le manque de connaissances géographiques est probablement l'une des principales raisons pour la présence d'accessions redondantes dans les collections ex situ. Les accessions avec une maturation précoce ou tardive, mais collectés dans différents lieux, vont fleurir et porter des fruits au même moment quand ils seront plantés côte à côte.
- La présence ou l'absence d'épines est un autre intéressant et important trait. Les systèmes de production modernes demandent principalement des cultivars inermes ; cependant il y a moins de variabilité dans les cultivars inermes comparés aux cultivars épineux, qui ont probablement émergé comme mutation de cultivars épineux. De plus, l'identification des accessions inermes est plus difficile puisque ce processus ne peut pas être complété à moins que les plantes aient des fruits.

La prospection des ressources génétiques de cactus a été un sujet d'intérêt depuis le début du vingt-et-unième siècle. Des études du germoplasme ont été conduites au Maroc (Arba *et al.*, 2002), en Turquie (Bekir, 2006), en Tunisie (Zoghalmi *et al.*, 2007), en Argentine et en Ethiopie (Haile et Belay, 2002; Mondragón Jacobo et Tegegne, 2006), permettant l'identification d'accessions pour la consommation locale en fruits frais principalement. Ces études se sont concentrées sur les souches domestiquées et semi-domestiquées. Des sources historiques indiquent une origine commune des figuiers de Barbarie présents dans ces zones ; des figuiers de Barbarie domestiqués rapportés du Mexique après la découverte des Amériques ont été dispersés par l'activité coloniale de l'Italie, de l'Espagne et d'autres pays Européens et par les Pays Arabes en Afrique du Nord et au Proche-Orient. Des observations de terrain soutiennent l'hypothèse que le pool d'origine était principalement restreint à des accessions domestiquées, qui se sont isolées et adaptées à ces nouveaux environnements. Pour cette raison, bien qu'elle soit signalée comme étant ample, la variabilité est en fait

relativement faible comparée au pool connu.

Il y a eu des efforts poussés au Mexique pour collecter les figuiers de Barbarie domestiqués et semi-domestiqués avec le soutien d'une initiative du gouvernement fédéral concentrée sur les cultures autochtones : le Système National de Ressources Génétiques de Plantes pour l'Alimentation et l'Agriculture (SINAREFI). Un projet plus modeste était la collecte d'ancêtres sauvages réalisée par l'Université Nationale Autonome du Mexique (UNAM) ; cette collection peut être visitée à l'UNAM dans la ville de Mexico. La prospection de germoplasme a atteint un palier et les équipes de recherche se sont alors tournées vers leur conservation et leur utilisation.

Que reste-t-il à collecter ? La région du Tigré en Afrique de l'Est mérite certainement une plus grande attention ; elle couvre une partie de l'Ethiopie et de l'Erythrée et affiche la plus grande aire de figuiers de Barbarie naturalisés en Afrique, ayant pour origine les introductions réalisées pendant le dix-neuvième siècle ; des efforts pour caractériser la variabilité locale sont rapportés par Mondragón Jacobo et Tegegne (2006). Le figuier de Barbarie s'est répandu dans des régions distantes pendant ses premières disséminations, atteignant des lieux improbables tels que la Chine, l'Inde et le Madagascar, et il est nécessaire d'explorer et de caractériser la variabilité présente dans ces lieux, de manière à la comparer avec les géotypes disponibles dans les banques de germoplasmes et d'évaluer les besoins de conservation et la présence de traits de valeur pour la production.

Un autre exemple pourrait être la récupération de la collection de Burbank, acquise par l'Afrique du Sud au début de vingtième siècle. La collection contient la plupart des variétés inermes développées par Luther Burbank en Californie, avec quelques accessions d'origine mexicaine et est actuellement sous la responsabilité de l'Université de l'Etat-Libre, qui a efficacement relié les ressources génétiques étudiées aux utilisations animales et à la nutrition humaine.

Entretien de germoplasme

L'entretien d'une collection de figuiers de Barbarie est coûteux, considérant que le figuier de Barbarie est une culture pérenne requérant une longue période pour stabiliser la production : 5-7 ans dans le cas de la production de fruits. Plusieurs années sont aussi nécessaires pour obtenir des résultats significatifs en ce qui concerne les utilisations comme fourrage ou légumes ; néanmoins, des données utiles sur la productivité et la qualité sont déjà disponibles après la deuxième année.

Un autre facteur important est la variabilité agro-climatique des zones de production : pour une étude consciencieuse, plus d'un site expérimental est requis,



augmentant substantiellement le coût des projets de recherche ou de recherche et développement et les fonds peuvent ne pas être facilement disponibles, en fonction du pays fournissant le soutien financier. Il y a une tendance globale aux projets de conservation à long terme devenant en soi, difficiles à vendre. L'entretien peut être facilité à travers la combinaison d'objectifs et de collaborations entre des équipes interdisciplinaires, utilisant les mêmes essais ou collections pour des buts simultanés ; néanmoins, des incertitudes persistent puisque chaque agence de financement fixe ses propres termes et calendrier des opérations.

BANQUES DE GERMOPLASMES, COLLECTIONS CŒUR ET ESSAIS DE CULTIVARS



Il est recommandé à tous les pays producteurs de figuiers de Barbarie d'acquérir, collecter, conserver et évaluer les génotypes différents de ceux en usage commercial. De telles collections servent de sites exploratoires et de réservoirs de nouvelles variabilités si nécessaire. Ils sont aussi une source précieuse d'information sur les performances des accessions individuelles sur des sites spécifiques, puisque l'adaptation et la productivité sont des traits difficiles à extrapoler.

L'étendue et la nature de ces collections varient : de l'essai de cultivars à la banque formelle de germoplasmes. Les banques de germoplasmes ne sont pas seulement recommandées, elles sont obligatoires dans les pays qui sont le centre d'origine et les centres secondaires. Les collections de référence sont de petites dimensions et contiennent des génotypes spécifiques utiles à la production et à l'évaluation agronomique préliminaire. Les essais de cultivars doivent inclure de nouveaux génotypes prometteurs - qu'ils soient strictement nouveaux ou simplement nouveaux dans la zone - et le plan impose, habituellement, la présence de répétitions. La mesure à laquelle l'évaluation du germoplasme est pertinente dépend de plusieurs facteurs :

- Culture - quelle importance a-t-elle ?
- Site - à quel degré représente-t-il bien l'agro-climat ?
- Les services de conseils - quelle efficacité ont les services liés à la production de figuier de Barbarie ?

DOCUMENTATION DES RESSOURCES GÉNÉTIQUES

La valeur des ressources génétiques entretenues dans une collection augmente si des données exactes et complètes sont rassemblées. En plus d'un passeport de

données adéquat, le suivi des performances des accessions au fil des années peut représenter une source valable d'informations pour les chercheurs et les conseillers. Les notes sur la gestion et l'entretien doivent être gardées pour :

- Suivre le statut des germoplasmes conservés à travers les phases de conservation ;
- Optimiser l'efficacité des programmes de conservation ;
- Faciliter les échanges de matériels et d'informations entre les banques de germoplasmes et les collections.

La principale préoccupation, à propos de la gestion des ressources génétiques, est l'augmentation du nombre d'accessions habituellement associées, avec des redondances. Pour écarter les doublons, et prévenir ou réduire l'addition d'accessions duplicatives aux collections de germoplasmes, une documentation complète des accessions existantes et des nouvelles entrées est nécessaire.

L'information associée aux accessions collectées est aussi importante que le matériel végétal gardé dans les banques de gènes (Given, 1994). Pour chaque accession, il devrait y avoir une information descriptive pour optimiser l'utilisation, répondre aux besoins des utilisateurs et étayer des décisions concernant le choix du génotype.

Comme pour les cultures majeures, la caractérisation et l'évaluation du pool de gènes disponibles sont essentielles pour les programmes de sélection du figuier de Barbarie. Les caractérisations phénotypiques et génotypiques des germoplasmes donnent l'opportunité d'identifier les accessions génétiquement diverses et agronomiquement supérieures pour l'amélioration de l'espèce d'*Opuntia* en tant que culture aux multiples utilisations (Chessa, 2010).

La simplicité, la rapidité et le coût relativement faible font des marqueurs/trait morphologiques, les marqueurs génétiques les plus utilisés pour la caractérisation des germoplasmes. Pour faciliter et standardiser la caractérisation des accessions collectées, une liste de descripteurs pour le figuier de Barbarie est disponible, et compilée selon le format international actuellement soutenu par Biodiversity International (Chessa et Nieddu, 1997). Une caractérisation basée sur la morphologie a aussi été réalisée, en suivant la liste des descripteurs et les catalogues proposés pour améliorer l'utilisation des accessions des collections mexicaines et sud-africaines (Gallegos Vázquez *et al.*, 2005; Potgieter et Mashope, 2009). Un schéma de classification pour l'identification des variantes, cultivées et sauvages, des espèces d'*Opuntia* d'origine mexicaine a été rapporté par Reyes Aguero *et al.* (2009). Une approche statistique pour identifier les caractères de la valeur du diagnostic différentiel est considérée comme fournissant une plus grande standardisation entre les collections et

pour adapter la liste des descripteurs à un but particulier (Erre et Chessa, 2013).

L'identification et la description des individus domestiqués présents en faible nombre dans les vergers familiaux pour l'usage domestique, ont été entreprises par des chercheurs mexicains. Ce sous-ensemble particulier est mis en péril par des gels et des averses de grêle inhabituellement violents - probablement liés au changement climatique - au changement d'utilisation des terres, à la migration et à d'autres facteurs économiques et sociaux. Ces anciennes variétés montrent les effets de la sélection sur le long terme ; ils sont aussi des porteurs de traits précieux utiles pour l'emploi immédiat par les sélectionneurs. Les rassembler dans les collections pour la sélection pourrait épargner un temps précieux dans le processus d'amélioration génétique. Une description de remarquables « variétés » locales et régionales, toutes comme celles de populations restreintes rencontrées au centre du Mexique, est fournie par Gallegos et Mondragón Jacobo (2011). Les descriptions incluent des données, des photos, des cartes de distribution et de brèves informations sur les traits commerciaux de ces « variétés ». Les données sont précieuses et d'intérêt non seulement pour les chercheurs mais aussi pour les fermiers, marchands et consommateurs, avec l'hypothèse que plus l'audience est large, plus l'effet est grand quant à l'intérêt de leur conservation.

Une plateforme commune, basée sur les mêmes traits, échelles et unités de mesure est nécessaire au niveau mondial pour faciliter les échanges d'information et de matériel végétal. Le Réseau d'Information des Ressources de Germoplasmes (GRIN) - un serveur internet (<http://www.ars-grin.gov>) donnant des informations sur le germoplasme des plantes, animaux, microbes et invertébrés - pourrait être utile pour le figuier de Barbarie. La base de données de la FAO Hortivar (<http://www.fao.org/hortivar/>), impliquant la collaboration directe des utilisateurs, se concentre sur les cultivars commerciaux des cultures horticoles ; les données sur les cultivars de figuier de Barbarie doivent encore être enregistrées.

UTILISATION DES OUTILS MOLÉCULAIRES MODERNES POUR EXPLIQUER LA VARIABILITÉ DU FIGUIER DE BARBARIE ET RÉDUIRE LES REDONDANCES

L'identification phénotypique basée seulement sur des marqueurs morphologiques peut être trompeuse à cause de l'interaction complexe entre le génotype et l'environnement qui régit la plupart des traits d'intérêt. La première étape vers l'application d'outils moléculaires pour étudier les ressources génétiques du figuier de Barbarie - redondance, phylogénie et transmission des traits de valeur - a été l'optimisation de l'extraction de

l'ADN. Depuis les années 1990, les protocoles ont été développés pour extraire l'ADN des cladodes et des racines, contournant ainsi le problème du mucilage (De la Cruz *et al.*, 1997; Griffith et Porter, 2003; Mondragón Jacobo et Doudareva, 2000). L'adaptation de kits commerciaux a grandement facilité le traitement d'un grand nombre d'échantillons, comme rapporté par Fehlberg *et al.* (2013), qui ont évalué l'efficacité du kit commercial DNeasy Plant Mini Kit (QIAGEN, Valencia, California, United States of America) pour extraire l'ADN des épines de huit espèces de cactus.

Les meilleurs outils pour l'évaluation de la diversité génétique sont les marqueurs basés sur le polymorphisme de l'ADN. Une large gamme de techniques de marqueurs moléculaires a été développée et est communément utilisée pour le génotypage d'individus et inférer des informations sur la structure génétique des collections de germoplasmes, et pour la découverte de synonymies et de parentés. Cependant, dans le cas d'espèces de cultures mineures comme le figuier de Barbarie, le développement et l'application de marqueurs moléculaires reste, en fait, limité.

Un regroupement de différentes variétés d'*Opuntia* et de biotypes a été achevé au moyen de la topographie des bandes des isozymes sur le pollen (Chessa *et al.*, 1997). A cause de la faible fiabilité de ces marqueurs affectée par les conditions environnementales, le type de tissus et le stade de la plante, des marqueurs, plus informatifs, dérivés de la PCR (Polymerase Chain Reaction) ont été utilisés.

Les marqueurs de l'amplification aléatoire d'ADN polymorphe (RAPD) ont été appliqués avec succès pour vérifier l'origine somatique au sein de quelques accessions mexicaines (Mondragón Jacobo, 2002). Pour identifier les accessions de cultivars à fruit, à légume et ornementaux, Wang *et al.*, (1998) ont appliqué la RAPD combinée avec des données morphologiques et physiologiques. La collection de la banque de germoplasmes de la Faculté d'Agronomie de l'Université Autonome de Nuevo León (FAUANL) a été décrite et des doublons ont été révélés au moyen de marqueurs RAPD (García Zambrano *et al.*, 2006) ; cependant ils n'ont pas été confirmés en utilisant les marqueurs de Polymorphismes de Longueur des Fragments Amplifiés (AFLP) (García Zambrano *et al.*, 2009). Des écotypes d'*O. ficus-indica* provenant de la Tunisie ont été caractérisés au moyen de marqueurs RAPD et 13 groupes principaux ont été identifiés, sans relation avec les régions géographiques différentes (Zoghliami *et al.*, 2007).

En utilisant l'AFLP, Labra *et al.*, (2003) ont suggéré qu'*O. ficus indica* devrait être considéré comme une forme domestiquée de l'épineux *O. megacantha*. Les marqueurs AFLP ont aussi été appliqués pour étudier les relations génétiques entre espèces dans trois collections d'*Opuntia* de la Tunisie (Snooussi Trifa *et al.*, 2009). Le niveau de



diversité génétique parmi les clones de cactus au Brésil a été évalué par marqueurs ISSR (Répétitions Séquentielles Internes Simples), montrant la faible différenciation génétique parmi eux (Souto Alves *et al.*, 2009). Dans le but d'évaluer la diversité, différents marqueurs moléculaires ont été appliqués, par exemple RAPD-PCR, et la répétition de séquence simple de chloroplaste (cp-SSR) (Chessa, 2010) et RAPD-PCR avec ISSR en utilisant l'ADN issu des semences (Luna Paez *et al.*, 2007).

L'histoire de l'évolution d'*O. ficus-indica* a été étudiée avec l'utilisation de les analyses phylogénétiques Bayésiennes de la séquence d'ADN des nrITS (ITS nucléaires ribosomiaux) (Griffith, 2004).

Les preuves moléculaires de l'origine hybride de différentes espèces d'*Opuntia* et la facilité de l'introgression ont été documentées et les origines polyphylétiques d'*O. ficus-indica* ont été admises (Griffith, 2003, 2009). L'hypothèse de Griffith considérant *O. ficus-indica* comme un groupe de multiples clones non apparentés, dérivés de différentes espèces parentes et sélectionnées pour des traits agronomiques communs a aussi été soutenue par Caruso *et al.* (2010) au moyen de microsatellites. Six répétitions de séquences simples (SSR) hautement polymorphiques développées par Helsen *et al.* (2009) et deux loci de marqueurs de séquence exprimée (EST)-SSR ont été utilisés pour relever l'empreinte de 62 génotypes d'*Opuntia* d'origine Mexicaine, Israélienne et Sicilienne. Une claire séparation entre les accessions cultivées et les espèces apparentées au figuier de Barbarie a été documentée.

Helsen *et al.* (2009) citent l'utilité des données moléculaires et morphologiques dans l'organisation de la conservation - basée sur la divergence morphologique relativement forte trouvée sur les espèces d'*Opuntia* endémiques des Galapagos, associée avec une faible variabilité génétique - comme preuve de sélections divergentes et d'adaptation aux environnements locaux. Les mêmes auteurs ont donné la preuve que l'actuelle différenciation taxonomique basée sur la morphologie entre les taxons d'*Opuntia* n'a pas été étayée par des données moléculaires.

La forte variabilité et la nature codominante des SSR ont fait d'eux des marqueurs de choix pour le relevé d'empreinte ADN dans la caractérisation des accessions d'*Opuntia* en Italie (Sardaigne). Un nouveau jeu de loci de microsatellites a été isolé chez différentes espèces et variétés d'*Opuntia* (Erre *et al.*, 2013). Cinq des dix loci de SSR développés ont été utilisés pour caractériser deux collections de plein champ d'Italie et d'Argentine. Le niveau de polymorphisme et le nombre relativement élevé d'allèles détectés suggèrent que ces marqueurs peuvent être utilisés aussi bien pour les études intra- et inter-espèces, que pour fournir un outil plus fiable dans la classification des espèces d'*Opuntia*, basée sur leurs profils alléliques.

CONSERVATION DES RESSOURCES GÉNÉTIQUES DE FIGUIER DE BARBARIE

Conservation *in situ*

La conservation *in situ* devrait être encouragée dans les centres d'origine et de diversité du figuier de Barbarie, avec une attention centrée sur les ancêtres sauvages et les types semi-domestiqués. Le Mexique Central est en train de subir un changement significatif dans l'usage des terres, qui met directement en danger les zones critiques de biodiversité ; les principales menaces sont la conversion des terres comme pâturage, la construction de nouvelles routes et la croissance des zones urbaines. La propriété des terres permet aux individus et aux communautés de décider du destin présent ou avenir des terres sauvages, compliquant ainsi, sur le long terme, les accords sur conservation.

Les menaces naturelles sous la forme de gelées inhabituelles, chutes de neige et de grêle - censées être associées au changement climatique - mettent aussi en jeu la survie des figuiers de Barbarie sauvages et semi-domestiqués, en particulier les variétés sensibles au gel. Un hiver tardif et rigoureux a été enregistré au printemps 2016 et certains des états, parmi les plus importants pour les figuiers de Barbarie sauvages dans le nord du Mexique Central, ont été couverts de neige et de glace ; les conséquences finales sont en train d'être évaluées.

Différentes approches pour encourager la conservation ont été promues au Mexique avec des niveaux de succès variables : les aires naturelles protégées (au niveau fédéral, étatique et municipal), des couloirs de nature pour le tourisme et d'autres schémas d'utilisation durable. De telles politiques doivent pondérer les effets attendus avec les intérêts sociaux et économiques des groupes humains impliqués. Toutes ces initiatives sont sous surveillance à cause des coupes budgétaires et des changements politiques, menaçant la protection de la ressource sur le long terme.

Conservation *ex situ*

Dans l'hémisphère est, la conservation *ex situ* est l'approche la plus active, avec des collections de plein champ en Tunisie, au Maroc et en Afrique du Sud. En dehors du Mexique, L'Italie a la plus grande et la plus vieille collection. Elle a débuté en 1992 et sert de banque de germoplasmes et de collection de sélection ; elle accueille des spécimens d'*Opuntia* et de *Nopalea* et le nombre actuel d'accessions est de 2 200. La collection inclue des variétés et sélections locales, des hybrides dérivés d'une pollinisation ouverte, des croisements contrôlés et des cultures d'embryons. Dans l'hémisphère ouest, des collections vivantes sont présentes en Argentine, au Chili, au Brésil et au Mexique ; la collection de



Kingsville au Texas n'est plus active mais le Département d'Agriculture des Etats-Unis (USDA) a monté une nouvelle collection sous la coordination du Dépôt National de Germoplasmes Clonaux à Parlier, Californie.

Alors que le Brésil a orienté ses efforts de conservation vers les accessions à fourrage, d'autres collections contiennent des entrées à fruits, fourrage et double usage. Le Mexique, en tant que plus grand centre de diversité, maintient plusieurs sites variant en taille, âge et en nombre d'accessions (**Tableau 1**). En 2010, il a lancé un projet de conservation *in vitro* des génotypes rares d'intérêt horticole immédiat. Le Brésil fait état de 1 417 accessions, incluant des génotypes de différents pays, ainsi que des ségrégants et des hybrides de croisements contrôlés. L'Italie fait état d'environ 2 200 entrées issues du Mexique, Chili, Etats-Unis d'Amérique, Maroc, Argentine et de l'Afrique du Sud ; elles incluent des types et écotypes sauvages, des variétés locales, des populations hybrides issues de croisements contrôlés et des plantes dérivées de cultures d'embryons.

Au début de 2011, le gouvernement Mexicain a inauguré le Centre National de Recherche pour les Ressources Génétiques et les Biotechnologies (CENARGEN) à Tepetitlan, Jalisco, pour servir de dépôt national ; ses locaux sont conçus pour le stockage à long terme de toutes les cultures et organismes liés à l'agriculture nationale, incluant le figuier de Barbarie.

UTILISATION : AMÉLIORATION ET SÉLECTION DES GERMOPLASMES

Les tentatives de sélection de figuier de Barbarie remontent à la fin du dix-neuvième siècle. Les résultats ont été mitigés pour deux raisons :

- La complexité biologique - tous les opuntias de valeur horticole sont polyploïdes et présentes des apomictes.
- La longue juvénilité - associée avec les résultats limités des programmes de sélection et les projets coûteux (traits directement liés au financement).

En conséquence, les programmes de sélection sont irréguliers, de courte durée et mal financés. Quatre programmes soutenus par les gouvernements Mexicain, Italien, Brésilien et Américain et une compagnie privée conduisent des sélections. Ils sont brièvement décrits ci-dessous.

Italie

Le programme de sélection Italien est impliqué dans la collection, la description et la documentation de germoplasmes depuis 1992. Il a réalisé des croisements et a été pionnier dans la culture d'embryon de figuier de Barbarie. Les produits obtenus comprennent 12 sélections à peau verte, jaune et rouge (4 de chaque) adaptées à la culture dans les pays méditerranéens.

TABLEAU 1

Inventaire des banques mexicaines de germoplasmes de figuier de Barbarie, mis à jour en 2014

Utilisation	CRUCEN ^a	IIZD ^b	CBTA ^c 38	INIFAP-SLP ^d	
Fruit frais	357	16	302	136	908
Fruit et fourrage	5	–	–	–	17
Fourrage	7	2	3	3	47
Légume	39	5	30	3	86
Triple usage	2	–	–	–	2
Non rapporté (n.a.)	–	23	–	–	28
Alimentation animale	–	–	–	–	29
Ornementale	–	–	–	–	4
Condiment	–	–	–	–	15
Total	410	46	335	142	1 021

^aCRUCEN: Centre Régional Universitaire Centre Nord, Université Autonome de Chapingo, El Orito, Zacatecas, Mexique.

^bIIZD: Institut de Recherche des Zones Désertiques, Université Autonome de San Luis Potosí, Mexique.

^cCBTA: Centre de Baccalauréat Technologique Agricole, Ojocaliente, Zacatecas, Mexique

^dINIFAP-SLP: Institut National de Recherche Forestière, Agricole et Animale – Champ Expérimental, San Luis Potosí, Mexique.

Mexico

Le programme a commencé en 1995 et a mené des hybridations et des sélections en utilisant les meilleurs génotypes mexicains pour la production de fruit afin d'obtenir des variétés à usages multiples et améliorer la qualité du fruit et son adaptation. A ce jour, trois variétés améliorées ont été signalées (Gallegos et Mondragón Jacobo, 2011). Depuis 2013, les activités du programme ont été réduites faute d'un financement stable.

Brésil

Localisé dans la zone tropicale semi-aride de Pernambuco, le programme se concentre sur le développement de variétés améliorées pour la production de fourrage. Son inventaire inclut les variétés 'Gigante', 'Redonda' et 'Miuda', 1 061 clones de 'Palma Gigante' en pollinisation libre, 171 clones de 'Palma Miuda' également en pollinisation libre et 159 clones issus de Chapingo (Mexique), plus 17 clones du CPATSA, 5 de Rio Grande do Norte et 4 de Petrolina, soit un total de 1417 accessions.

Etats-Unis d'Amérique

D'Arrigo Bros, une compagnie privée américaine intéressée par la production de figuiers de Barbarie et sa sélection à Salinas en Californie, a fait état de quatre variétés améliorées développées pour l'utilisation privée : 'Sweet Emerald', 'Sweet Crimson', 'Sweet Purple' et 'Sweet Sunset' (<http://www.andyboy.com/products/cactus-pear>), renforçant sa ligne de produits frais originaux.

L'Unité Nationale de Ressources Génétiques des Plantes des Terres Arides (NALPGRU) du Service de Recherche Agricole de l'USDA (ARS) à Parlier en Californie main-

tient et évalue les germoplasmes de plantes adaptées aux conditions arides et au niveau élevé de sel, sélénium et bore dans les sols. Le résultat en est quatre nouveaux brevets de cultivars, possédés à part égale par Fresno State, Diener's Red Rock Ranch et l'USDA. Red Rock Ranch entend développer et mettre en marché des produits sous la forme de jus et de mélanges de poudres dérivés des nouvelles plantes (<https://www.fresnostate.edu/jcast/cati/update/2013-fall/opuntia-study.html>).

VERS UNE UTILISATION DURABLE DU FIGUIER DE BARBARIE

Les nouvelles variétés sont l'axe de tous les systèmes durables ; elles sont en développement au Mexique, au Brésil et en Italie et dans une certaine mesure aux Etats-Unis d'Amérique. Puisque les pays sous-développés peuvent bénéficier le plus de la culture du figuier de Barbarie, la **collaboration internationale** a besoin d'être encouragée, avec les pays partageant leur expertise, leurs ressources génétiques et installations. Pour atteindre cela, les centres internationaux doivent piloter des projets collaboratifs.

En attendant, les pays ayant des souches autochtones ou naturalisées devraient intensifier la collecte, la caractérisation et l'évaluation des meilleures entrées, et ensuite la propagation des sélections remarquables à travers des protocoles phytosanitaires stricts. Pour les autres pays, nouveaux dans la culture de cactus, il est recommandé d'introduire des génotypes sélectionnés, de les tester et d'en propager les plus performants dans les conditions locales avant de lancer des programmes de culture à grande échelle.



Production de fruits et gestion post-récolte

Johan Potgieter^a et Salvatore D'Aquino^b

^a Consultant en horticulture, Elands Bay, Cap Occidental, Afrique du Sud

^b Conseil National de la Recherche, Institut des Sciences de Production des Aliments, Sassari, Italie



INTRODUCTION

Une expansion mondiale de la culture du figuier de Barbarie a été prédite par Nobel en 1988. Ces prédictions étaient partiellement basées sur l'écologie particulière du figuier de Barbarie, qui permet le développement de systèmes de production agricole durables dans des zones avec des sols pauvres et une ressource en eau limitée (Inglese *et al.*, 1995a). De plus, il y avait un intérêt croissant pour la production de fruits de figuier de Barbarie lié à une plus grande demande en fruits exotiques sur les principaux marchés du monde (Inglese *et al.*, 1995a). De plus, la restriction en eau d'irrigation pour l'expansion des cultures principales dans les zones arides et semi-arides, a forcé les agriculteurs à chercher des cultures alternatives avec une meilleure tolérance à la sécheresse et une meilleure efficacité d'utilisation d'eau (WUE de l'anglais Water Use Efficiency). La plante est cultivée dans une large gamme d'environnements, ce qui a conduit à des modes de gestion des vergers, des qualités de fruit et rendement qui diffèrent selon les pays (Inglese *et al.*, 2009 ; Liguori et Inglese, 2015). Heureusement, depuis les années 1990, beaucoup plus d'informations sont devenues disponibles sur le management des vergers et sur d'autres aspects de la culture du figuier de Barbarie (Felker et Inglese, 2003).

Actuellement la culture du figuier de Barbarie pour la production fruitière se pratique dans au moins 18 pays des zones semi-arides des deux hémisphères sur plus de 100 000 ha (Inglese *et al.*, 2002a) ; ce chiffre n'inclut ni les plantes naturalisées ni celles cultivées pour l'autoconsommation, fréquemment rencontrées dans plusieurs pays (Inglese *et al.*, 2002a). Le pays avec la plus grande surface de culture de fruit de cactus est le Mexique (51 112 ha) (Reyes Aguero *et al.*, 2013), alors que d'autres pays tels que l'Italie, le Chili, l'Afrique du Sud, l'Argentine et Israël, cultivent aussi ce fruit pour sa commercialisation (Inglese *et al.*, 2002a).

La fausse idée que le figuier de Barbarie n'ait pas besoin d'être cultivé comme les autres cultures, et que peu ou pas de soins permettent tout de même une productivité élevée, persiste aujourd'hui à un certain degré. Même les premiers chercheurs sur le figuier de Barbarie - Griffiths (1909) et Turpin et Gill (1928) - ont imputé ce lieu commun à la facilité avec laquelle la plante pousse dans pratiquement tous les environnements. Aujourd'hui nous savons que ce n'est pas vrai: pour être rentable, la plante requiert des soins appropriés.

PLANIFICATION ET MISE EN PLACE DU VERGER

Une planification consciencieuse est cruciale pour mettre en place un verger de figuier de Barbarie à vocation commerciale et beaucoup de décisions doivent être prises avant de planter. De nombreux aspects doivent être pris en compte :

- le méso- et microclimat du site de la culture ;
- les analyses chimiques et physiques du sol ;
- le choix de cultivar ;
- la préparation du sol ;
- la commande du matériel végétal ;
- la plantation de brise-vent ;
- la détermination des distances de plantation et l'orientation des rangs ;
- l'installation d'un système d'irrigation.

La sélection du site

La distribution mondiale du figuier de Barbarie est indicatrice de sa considérable adaptabilité à divers facteurs pédoclimatiques (Brutsch, 1979). Les plantes de figuier de Barbarie peuvent tolérer de très hautes températures sans conséquences négatives (Nobel *et al.*, 1986) ; de plus, les sites de plantation où la température descend en dessous de -5°C devraient être évités puisque la plupart des cultivars sont détruits à ces températures (Inglese, 1995). Les zones de basse altitude où le gel se produit en fin d'hiver et début de printemps peuvent causer l'avortement des bourgeons floraux avec une perte totale ou partielle de la récolte (Wessels, 1988b; Inglese, 1995; Nerd et Mizrahi, 1995a). La gamme optimale de température pour l'assimilation nocturne de CO₂ est 25/15°C jour/nuit pour le figuier de Barbarie, car des températures de jour plus élevées ou de nuit plus basses engendrent une réduction de l'assimilation du carbone, réduisant la croissance et la productivité de la plante (Nobel 1994; Nobel et Bobich, 2002). Les variations de température pendant la période de débournement floral (de la fin de l'hiver au printemps) et pendant la période de développement du fruit (PDF) ont un effet particulièrement significatif sur la productivité et la qualité du fruit. La plupart des espèces d'*Opuntia* sont faiblement adaptées à de longues périodes de temps frais et humides (Brutsch, 1979).

Dans la plupart des pays caractérisés par des précipitations estivales prédominantes, le figuier de Barbarie est culti-

vé sans irrigation ; cependant l'irrigation est nécessaire quand la période sèche de l'année correspond à la PDF ou quand les précipitations annuelles sont inférieures à 300 mm (Inglese, 1995). Le figuier de Barbarie est cultivé avec succès dans les zones avec une saison de précipitations hivernales quand des réserves sont faites pour l'irrigation pendant les mois d'été chauds et secs. La limite de précipitation maximale est de 1 000 mm par an (Le Houérou, 1992, 1996a), mais les précipitations élevées sont moins favorables puisqu'elles engendrent une faible pollinisation, accroissent la présence de maladies fongiques et la fissuration des fruits et en réduisent la qualité (Wessels, 1989).

Étant donnée la succulence de la plante et du fruit, il est facilement endommagé par la grêle, et la production commerciale de fruits devrait être évitée là où la grêle est un phénomène régulier (Wessels, 1988a; Brutsch, 1997a). Les dommages physiques causés par la grêle facilitent l'entrée de champignons pathogènes dans la plante (Granata, 1995; Swart *et al.*, 2003) et affectent la présentation esthétique du fruit, le rendant non-commercialisable.

Snyman (2004, 2005) a montré qu'à 2 ans, les racines d'*O. ficus-indica* constituent seulement 7% de la biomasse totale - mettant en évidence la grande différence entre la biomasse racinaire et aérienne durant les premières années de croissance de la plante. En conséquence, de forts vents accompagnés de pluie peuvent abattre les plantes, spécialement quand ces dernières sont jeunes et que le système racinaire n'est pas encore suffisamment développé pour la maintenir dressée.

Il est important d'examiner soigneusement les particularités microclimatiques pour sélectionner le site le plus approprié pour la mise en place du verger. Par exemple, dans l'hémisphère sud, un site exposé au nord est plus chaud qu'un site exposé au sud ce qui a pour conséquence une récolte plus précoce et une amélioration de la qualité du fruit.

Alors que le figuier de Barbarie est cultivé dans une large gamme de types de sols (Inglese *et al.*, 2002a), il est important de sélectionner les meilleurs sols disponibles pour une productivité élevée (Wessels, 1988a). Les sols avec une texture sableuse à sablo-limoneuse sont idéaux (Vazquez-Alvarado *et al.*, 2006), mais les figuiers de Barbarie peuvent aussi bien pousser dans des sols plus lourds. Wessels (1988b) a remarqué que le drainage d'un sol est un facteur plus limitant que le type de sol. Le figuier de Barbarie est très sensible à un manque d'oxygène dans le sol (Brutsch, 1979; Le Houérou, 1992, 1996a) mais les sols très sableux ont une faible capacité de rétention d'eau et sont plus sujets à la lixiviation des nutriments (Wessels, 1988a). La plante préfère un pH de sol (eau) neutre à légèrement alcalin (Wessels, 1988b; Zegbe *et al.*, 2015). Le sol sélectionné pour une plantation devrait être profond de 300 mm au minimum (Wessels, 1988a) même si des sols plus profonds (600-700 mm) sont préférés pour la

production commerciale (Inglese *et al.*, 2002a).

La plupart des espèces d'*Opuntia* ne tolèrent pas la présence, même à un niveau modéré, de sels dissous dans la zone d'enracinement. Puisque l'assimilation nette de CO₂ est inhibée, cela affecte négativement la croissance végétative des cactus dans les sols ayant des teneurs élevées en chlorure de sodium ou en carbonate de calcium (Nobel, 1994, 1995). Gersani *et al.* (1993) rapportent une réduction de croissance de la plante de 40% avec une concentration de 30 mol m⁻³ (1.76 g litre⁻¹ NaCl) et une réduction de 93% avec une concentration de 100 mol m⁻³ (5.85 g litre⁻¹ NaCl).

Préparation du sol

La préparation du sol avant la plantation est essentielle pour réussir la production de figues de Barbarie et ne peut pas être adéquatement réalisée après l'installation du verger. Le défrichage et le nivellement du sol peuvent être requis (Inglese, 1995) ; les tuyaux d'irrigation peuvent être installés et les rangs de plantation marqués. Dans les zones où le gibier et les animaux domestiques peuvent endommager les jeunes plants, il est nécessaire de clôturer.

Les conditions de sol défavorables telles que des couches impénétrables, l'infestation par des adventices pérennes et la faible profondeur de sol doivent être résolues avant la plantation (Wessels, 1988b; Inglese *et al.*, 2002a). Un travail du sol profond (au moins 500 mm) avec une sous-soleuse sur le rang de plantation est nécessaire pour briser toute couche dure et améliorer le drainage, l'aération et la capacité de rétention de l'eau. Dans les sols plus lourds et compacts, un travail profond du sol croisant les rangs peut aussi être bénéfique : il aide la plante à survivre pendant les années de faibles précipitations pendant lesquelles elle peut utiliser l'eau des horizons plus profonds du sol (Inglese, 1995 ; Potgieter, 2001). Dans des sols très superficiels, la formation de buttes est recommandée (Singh, 2003). Il est important de maîtriser - soit mécaniquement soit chimiquement - les adventices pérennes avant la mise en place puisqu'elles concurrencent fortement les plants de figuier de Barbarie, surtout pendant les premiers stades de croissance de la plante (Wessels, 1988b).

Fertilisation avant la plantation

Des amendements du sol pour corriger les déséquilibres en éléments minéraux et le pH doivent être faits avant la mise en place. Un pH du sol (eau) de 6.5-7.5 est considéré comme optimum (Wessels, 1988a, b ; Singh, 2003). L'application de fertilisants devrait être basée sur les résultats des analyses de sol, qui indiquent le niveau de nutriments pour les plantes dans le sol (**Tableau 1**).



TABLEAU 1

Niveaux optimums des nutriments du sol préconisés pour la production de figues de Barbarie en culture pluviale dans les zones à précipitations estivales d'Afrique du Sud

Elément	Niveau optimal du sol (mg kg ⁻¹)
P	20-30
K	80-100
Ca	> 400
Mg^a	100-150

^aLe niveau de Mg ne devrait pas dépasser celui de Ca.

Source: Potgieter, 2001, 2007 (adapté).

Des échantillons représentatifs de l'horizon superficiel (0-300 mm) et de l'horizon profond (300-600 mm) doivent être prélevés pour l'analyse chimique et physique. Les effets secondaires du pH du sol sur la disponibilité des autres nutriments de la plantes sont probablement plus importants que le pH du sol en lui-même. Par exemple, P devient moins disponible pour les plantes à un faible pH du sol (Nobel, 1988). Le Ca et le P sont relativement immobiles dans les sols et en conséquence, ils doivent être consciencieusement mélangés au sol avant la plantation. En plus de réduire la croissance végétative et le poids sec (Berry et Nobel, 1985), une salinité du sol élevée réduit aussi la teneur en eau du cladode, l'assimilation de K et de Ca ainsi que le ratio racine-tige (Nerd *et al.*, 1991c). L'ajout de gypse aide à neutraliser l'excès de sels dans la solution du sol. Le figuier de Barbarie réagit très bien au

fumier organique qui améliore aussi la structure du sol, la teneur en nutriments et la capacité de rétention d'eau (Inglese, 1995 ; Singh, 2003). Comme recommandation générale, 6-10 tonnes ha⁻¹ de fumier animal bien composté doivent être incorporées au sol avant de planter.

Brise-vent

Dans les zones venteuses, il peut être bénéfique de planter des brise-vent vivants pour minimiser les effets négatifs du vent sur les vergers de figuiers de Barbarie. De fortes précipitations accompagnées de forts vents peuvent abattre les jeunes plantes et causer même la rupture des cladodes et des branches (Felker *et al.*, 2005). La pollinisation et les pulvérisations phytosanitaires sont négativement affectées par les vents forts ; il est difficile d'accomplir les travaux du verger (taille, éclaircissage des fruits, récolte) dans des conditions venteuses puisque les glochides tendent à être emportés par le vent (Wessels, 1989). Quand les cladodes en développement et les fruits sont trop proches les uns des autres sur un cladode, les fruits peuvent être endommagés par friction pendant les coups de vents. Un brise-vent vivant doit être adapté à la zone de plantation et ils devraient être arrosés et fertilisés pour s'assurer qu'ils ne concurrencent pas le verger. Un arbre populaire utilisé comme brise-vent vivant dans les vergers est le bois bœuf australien (*Casuarina* spp.).

Choix du cultivar

Le nombre de cultivars de figuier de Barbarie fruitiers disponibles varie significativement entre les pays. Le

TABLEAU 2 Caractéristiques des principaux cultivars de figuier de Barbarie à fruits dans les pays producteurs

Nom du cultivar	Pays	Espèce	Présence d'épines	Couleur de la peau/pulpe	Saison de maturation	Poids du fruit	Pulpe	SST	Manutention post-récolte
				50% de couleur de la peau	Hémisphère nord	g	%	°Brix	
Algerian	AS	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Rouge/rose foncé	Juil./Aout	162	59.4	13.9	Modérée
Gymno Carpo	AS	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Jaune/Orange	Aout/Sept	170	61.7	11.2	Modérée
Meyers	AS	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Rouge/rose foncé	Juil./Aout	176	60.7	13.6	Bonne
Morado	AS	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Vert/Blanc	Juil./Aout	146	60.0	14.4	Faible
Nudosa	AS	Unknown	Peu présentes	Rouge/rouge	Aout/Sept	236	60.8	11.2	Bonne
Roedtan	AS	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Jaune/Orange	Aout/Sept	171	60.7	14.2	Modérée
Turpin	AS	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Jaune/Orange	Juil./Aout	181	55.0	13.6	Modérée
Zastron	AS	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Vert clair/blanc	Juin/Juil.	137	57.2	13.5	Bonne
Reyna	Mexique	<i>O. albicarpa</i>	épineuse	Vert clair/ vert clair	Juil./Aout	120	63.7	16.4	Faible
Cristalina	Mexique	<i>O. albicarpa</i>	épineuse	Vert clair/ vert clair	Aout/Sept	207	60.2	12.7	Bonne

(suite)

Nom du cultivar	Pays	Espèce	Présence d'épines	Couleur de la peau/pulpe	Saison de maturation	Poids du fruit	Pulpe	SST	Manutention post-récolte
				50% de couleur de la peau	Hémisphère nord	g	%	°Brix	
Villanueva	Mexique	<i>O. albicarpa</i>	épineuse	Vert/ vert clair	Juin/Juil.	129	60.9	14.4	Faible
Burrona	Mexique	<i>O. amyclaea</i>	épineuse	Vert clair/ vert clair	Sept./Oct.	217	59.8	12.7	Très bonne
Roja San Martin	Mexique	<i>O. ficus-indica</i>	Peu présentes	Rouge violet/ violet	Juil./Aout	116	44.5	13.7	Faible
Naranjona	Mexique	<i>O. megacantha</i>	Peu présentes	Jaune /orange	Aout/Sept	170	51.7	13.1	Très bonne
Roja Vigor	Mexique	<i>O. ficus-indica</i>		Rouge vif/rouge	Juil./Aout	174			Modérée
Dellahia	Maroc	<i>O. megacantha</i>	absentes	Vert clair/ vert clair		100	53.1	14.0	
Moussa	Maroc	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Jaune/orange	Déc.	101	51.0	14.4	
Aissa	Maroc	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Jaune/orange		96	50.0		
Gialla	Italie	<i>O. ficus-indica</i>	absentes			103	51.0	13.0	Bonne
Rossa	Italie	<i>O. ficus-indica</i>	absentes						
Bianca	Italie	<i>O. ficus-indica</i>	absentes			112	53.6		
Amarilla sin Espinas	Argentine	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Jaune/vert				13.9	
Ofer	Israël	<i>O. ficus-indica</i>	absentes	Jaune/orange					
Andy Boy	USA								
Verde (Criolla)	Chili	<i>O. ficus-indica</i>	épineuse	Vert/vert	Fev-Avr.	132	49.6	13.3	Bonne

AS = Afrique du Sud ; USA = Etats-Unis d'Amérique.

Mexique et l'Afrique du Sud ont de nombreux cultivars alors que le choix de cultivar est plutôt limité dans la plupart des autres pays producteurs (Inglese et al., 2002a). Le choix d'un cultivar pour fruits frais dépend premièrement des conditions climatiques du site de plantation et de la demande du marché. Les espèces et les cultivars d'*Opuntia* diffèrent grandement en ce qui concerne leur potentiel de rendement fruitier, les critères de qualité et l'adaptabilité aux conditions environnementales. Tous les cultivars n'ont pas la même adaptation à une zone particulière ; en effet la plupart des cultivars présentent une forte interaction génotype-environnement (G x E) (Potgieter, 2007). Les cultivars doivent être choisis judicieusement ; changer un cultivar après la mise en place entraîne un coût très élevé parce que les plantes ont leurs propres racines et le greffage ou le surgreffage ne sont pas économiquement viables.

De plus, les caractéristiques du cultivar doivent être soigneusement examinées (**Tableau 2**) avant de prendre la décision finale : il peut y avoir des

préférences pour un cultivar spécifique pour approvisionner un marché particulier. Par exemple, les cultivars avec une pulpe jaune, orange, rose ou rouge sont préférés dans la plupart des marchés européens et nord-américains, alors que les pulpes blanches et vertes sont préférées par les consommateurs sud-africains (Wessels, 1988) et mexicains (Mondragón Jacobo et Perez Gonzalez, 1994, 1996). Si les producteurs envisagent d'exporter les fruits, le choix du cultivar prend même plus d'importance puisque des caractéristiques comme l'apparence, la résistance post-récolte à la manutention et la durée de vie jouent un rôle majeur pour une exportation réussie. Les producteurs devraient prendre en compte que certaines caractéristiques de cultivars peuvent être influencées par les techniques mises en œuvre dans l'environnement du verger. Par exemple, bien que le poids du fruit puisse être génétiquement contrôlé, il peut être influencé par l'éclaircissage, l'irrigation, la fertilisation et la taille. Des variations annuelles de rendement de fruits et de qualité sont aussi visibles dans la plupart des vergers commerciaux.



CONCEPTION ET AGENCEMENT DU VERGER

Orientation des rangs

L'orientation des rangs, à la différence de la densité d'arbres, est fixe et ne peut pas être changée durant la vie du verger. Selon Nobel (1982), les cladodes de figuier de Barbarie sont disposés pour être exposés est-ouest, sauf à des latitudes plus basses ($> 27^\circ$) et dans les zones où la croissance végétative se déroule en hiver. Dans ces situations, l'orientation du rang est moins importante (Nobel, 1982). Une fois que l'orientation des rangs est décidée, il est important d'atteindre une utilisation optimale de la lumière sur toute la canopée de l'arbre pendant la journée (García de Cortázar et Nobel, 1991; Stassen *et al.*, 1995). Alors que l'orientation des rangs généralement préférée est nord-sud pour capter une irradiance solaire journalière égale dans des conditions de ciel dégagé et nuageux, elle peut être adaptée pour être en adéquation avec la latitude, le site et l'incidence des brûlures du soleil. Il y a d'autres considérations pratiques telles que les champs en pente où il est recommandé de planter selon les courbes de niveau pour éviter l'érosion du sol (Inglese, 1995; Stassen *et al.*, 1995).



Système de plantation

Le choix du type de plantation et des écartements dépend de la taille de la ferme, de sa gestion, des outils, du climat, de la fertilité du sol, du comportement du cultivar lors de sa croissance, de l'architecture des plantes et de l'apparition de ravageurs tels que la cochenille (Wessels, 1988b ; Inglese, 1995).

Haies

Divers modes de plantation peuvent être employés pour la production de figues de Barbarie, mais durant ces dernières années, les haies de haute densité plantées en rectangles sont devenues la norme dans les grands vergers commerciaux d'Afrique du Sud (Unterperntinger, 2006), d'Israël (Nerd et Mizrahi, 1993), des Etats-Unis d'Amérique (Californie) (Bunch, 1996) et d'Argentine (Felker et Guevara, 2001). Les haies ont pour avantage de réduire les coûts d'intrants. Elles permettent aussi une meilleure application des pulvérisations, et la capture des radiations solaires est maximisée, conduisant à une plus grande productivité.

Plantation rectangulaire ou carrée (arbres séparés)

En Italie, les arbres sont habituellement largement espacés selon une maille rectangulaire ou carrée ; pourtant des rendements en fruits similaires ont été rapportés en Israël et en Italie avec des différents écarts entre plantes (Inglese *et al.*, 1995a).

Espacement

L'espacement des plantes pour la production de figues de Barbarie varie grandement, en fonction de l'hémisphère, du pays et de l'environnement. En Italie, les distances de plantation sont généralement larges et varient de 6 x 6 m (278 plantes ha^{-1}) à 4 x 6 m (416 plantes ha^{-1}) (Inglese, 1995 ; Inglese *et al.*, 2002b ; Tudisca *et al.*, 2015). Dans les autres lieux du bassin Méditerranéen, les plantes sont beaucoup plus rapprochées. Par exemple, en Israël, on pratique 1.5 m sur le rang et 4 m entre les rangs (1 666 plantes ha^{-1}) pour augmenter le rendement en fruits pendant les premiers stades de la vie du verger (Nerd et Mizrahi, 1993). Une gamme de densité de plantation de 500 à 2000 arbres ha^{-1} a été testée en Jordanie où les plantes sont séparées sur le rang de 1 à 2 m, avec des rangs écartés, l'un de l'autre, de 5 à 10 m et habituellement positionnés en courbes de niveau (Nasr, 2015). En Californie, l'écartement entre plantes est de 1.5-4 m sur le rang et 4-6 m entre rangs (830-1 666 plantes ha^{-1}) (Bunch, 1996). Dans les grandes fermes du Mexique, les plantes sont espacées 4 x 5 m (500 plantes ha^{-1}) (Pimienta Barrios, 1990). Dans l'hémisphère sud, les vergers les plus récents d'Afrique du Sud sont mis en place en système de haies avec une disposition de 2 x 5 m à 2 x 4 m sur et entre les rangs (1000-1250 plantes ha^{-1}). En Argentine, Targa *et al.*, (2013) ont rapporté des espacements de plantes de 1.5 m sur le rang et 6 m entre les rangs (1 111 plantes ha^{-1}) en haies continues.

Quel que soit l'espacement utilisé, il est important de garder ouvert un inter rang de travail d'environ 1.8 m pour le mouvement des machines de la ferme (Wessels, 1988b ; Gittens, 1993).

Plantation à haute densité

Un problème général dans la culture de figuiers de Barbarie se pose quand les plantes, sans contrôle, deviennent trop grandes, donnant lieu à une « forêt » plutôt qu'à un verger productif. De grandes portions de ces grands arbres, plus spécialement les parties basses de la canopée, sont complètement ombragées (Liguori et Inglese, 2015). En conséquence, la fructification est limitée à la périphérie externe de la canopée et le coût du travail à la récolte est élevé. Etant donné les coûts toujours croissants des terres et des intrants de production, il est nécessaire de réévaluer sérieusement le système de plantation, la densité et la gestion des arbres en relation avec le rendement en fruits et la qualité (Stassen *et al.*, 1995; Liguori et Inglese, 2015). De faibles densités de plantations ne sont pas justifiées économiquement ; néanmoins, il y a deux écoles de pensée sur l'écartement des plantes :

- **Planter les arbres à une densité élevée et en supprimer certains quand ils empiètent les uns sur les autres.** L'objectif est d'obtenir une grosse récolte précocement. Un faible espacement (1-1.5 m) sur le rang maximise le rendement pendant les premières

années après la plantation, mais peut donner lieu à un ombrage excessif après quelques années. Par conséquent davantage de taille et l'élimination d'arbres tous les deux ou trois ans sont nécessaires pour éviter la baisse du rendement et de la qualité des fruits (Inglese *et al.*, 1995a; Inglese *et al.*, 2002a). Barbera et Inglese (1993) recommandent plus de boutures par trou de plantation, espacés de 4 m, conduisant à une augmentation rapide du SAI (Indice de surface de tige). Cela donne des arbres avec le plus de production sur les cladodes périphériques. Cependant, les arbres atteignent rapidement 3-3.5 m de haut et 4-4.5 de large entraînant des coûts de taille et de récolte élevés (Inglese *et al.*, 1995a). En plus du problème de l'ombrage excessif, les canopées denses favorisent aussi les infestations par les cochenilles et réduisent l'efficacité du contrôle des ravageurs (Inglese, 1995b). Une densité de plantes élevée (2500 plantes ha⁻¹) donne un rendement de fruits élevé (> 30 tonnes ha⁻¹) pour des plantes de 3 ans ; cependant, avec le vieillissement des plantes, la croissance végétative devient plus importante que la croissance reproductive (García de Cortázar et Nobel, 1992).

- **Planter les arbres selon une densité élevée raisonnable et utiliser les techniques de conduite des arbres pour les former et les contenir dans l'espace alloué** (Stassen *et al.*, 1995). Un faible espacement sur le rang maximise le rendement en fruits chez les jeunes plants puisque le nombre de cladodes fertiles par unité de surface augmente (Inglese *et al.*, 2002a). Cette approche est dépendante de l'utilisation de techniques de conduite pour maintenir un volume de plante spécifique. La hauteur des arbres ne devrait pas dépasser 80% de l'écartement entre les rangs pour éviter de faire de l'ombre aux parties basses des haies (Stassen *et al.*, 1995), ce qui les rend moins fécondes. A la condition que l'entretien de conduite des arbres soit fait annuellement, cette stratégie est plus efficace que le choix des densités de plantes plus faibles. Cependant, si la gestion des arbres ne peut pas se faire pour quelque raison que ce soit, il est recommandé de maintenir une faible densité des arbres.

MISE EN PLACE

L'enracinement des cladodes et la croissance végétative s'ensuivant dans le champ, dépendent de nombreux facteurs. Des observations dans de nombreux vergers commerciaux ont révélé un degré élevé de variabilité malgré l'utilisation de matériel végétatif (Brutsch, 1979 ; Wessels, 1988a), indiquant la nécessité d'une sélection soignée du matériel à planter.

Sélection et préparation du matériel végétal

Le figuier de Barbarie pour la production fruitière est principalement propagé par clonage pour assurer la stabilité du type (Wessels, 1988b). Là où les fermiers n'ont pas leurs propres plants de figuier de Barbarie, il est préconisé de commander le matériel végétal de bonne qualité. Les techniques de boutures à un seul cladode et à multiples cladodes sont utilisées dans le monde pour la mise en place de vergers.

Boutures d'un seul cladode

Des boutures (cladodes) d'un ou deux ans peuvent être utilisées, même si les boutures d'un an développent des racines plus longues et en plus grande quantité que celles de 2 ans (Arba, 2009b). En général, des cladodes terminaux, grands, matures, uniques, d'apparence uniforme, visiblement indemnes de tout défaut, d'insectes et de maladies, devraient être retenus comme matériel végétal (Potgieter, 2007). Barbera *et al.*, (1993b) et Wessels *et al.*, ont rapporté que la surface et le poids sec des boutures ont une influence significative sur le succès de l'enracinement et le bourgeonnement au champ. Une surface de 500 cm² ou un poids sec de 70-100 g permet une bonne croissance de la plante. Inglese (1995) recommande de placer deux boutures espacées de 0.4 m l'une de l'autre en un même lieu de plantation pour un développement rapide de la canopée ou alternativement 3-4 boutures à un cladode positionnées en triangle ou carré et espacées de 0.3 m les unes des autres. Bien que cette méthode ait l'avantage d'avoir un développement de la canopée plus rapide, il engendre un espacement sur le rang plus important et requiert de grandes quantités de matériel végétal (Inglese, 1995 ; Mondragón Jacobo et Pimienta Barrios, 1995). Un seul cladode comme unité de propagation a l'avantage de réduire les coûts de transport et de simplifier la manipulation pendant la plantation.

Boutures à multiples cladodes

Le figuier de Barbarie peut aussi être propagé en utilisant des cladodes matures attachés (un, deux ou plus) ; c'est une pratique commune en Sicile où des boutures à multiples cladodes de 2-3 ans sont utilisées (Tudisca *et al.*, 2015). Une grande partie du cladode basal est mise en terre pour assurer la stabilité de la plante (Inglese, 1995). Les boutures à multiples cladodes permettent un développement de la plante plus rapide et une fructification plus précoce après la plantation que les boutures à un seul cladode (Homrani Bakali, 2013 ; Nasr, 2015). Cependant, à cause de leur taille et leur poids, elles sont plus difficiles à manipuler et à transporter.

Les boutures peuvent être séchées pendant 4-6 semaines à mi-ombre sur une surface sèche pour permettre à la blessure de coupe de cicatriser (Potgieter, 2001 ; Inglese *et al.*, 2002a). Autrement, divers fongicides à base de



cuire peuvent être utilisés pour traiter la blessure de coupe avant de planter (Inglese, 1995). Pour éviter l'introduction d'insectes (Par exemple : la cochenille et la mouche du figuier de Barbarie) dans les nouvelles zones de plantation, il est recommandé de désinfecter les cladodes consciencieusement avec un insecticide homologué avant de planter. Les stades immatures de la cochenille sont à peine visibles à l'œil nu et un producteur qui ne se méfie pas peut amener la cochenille dans une zone où elle n'était pas présente auparavant avec des conséquences potentiellement dévastatrices. Les cladodes devraient être lavés avec l'insecticide en utilisant une brosse douce pour détruire tout « éventuel insecte ».

Méthode et profondeur de plantation

Dans les sols sableux, les boutures ont besoin d'être plantées plus profondément que dans les sols plus lourds pour éviter que les plantes se couchent ; de même, les petits cladodes devraient être plantés plus profondément pour assurer un enracinement adéquat. Il y a trois manières de planter les cladodes : en position **droite** ; inclinée sur le côté avec un angle de 30-45° ; ou à plat. La position droite est la plus communément adoptée (Inglese, 1995) et est préférée pour la production de fruits. Les boutures sont plantées droites (verticalement) avec la plaie de la coupure pointant vers le bas enterrée dans le sol. Les plantes s'enracinent rapidement et une plante robuste se développe (Arba, 2009b; Arba et Benrachid, 2013). Les cladodes devraient être positionnés avec le côté plat vers l'entre-rang. Pour assurer un bon contact entre le sol et les boutures, le sol doit être bien tassé autour des cladodes après la plantation. Le seul désavantage de cette méthode de plantation est le pourrissement possible de la plaie de coupe (Wessels, 1988b).

Date de plantation

Les cladodes et les racines atteignent leur plus fort taux de croissance en fin de printemps et début d'été (Wessels, 1988b). Dans les zones à précipitations estivales, les cladodes nouvellement plantés bénéficient des pluies qui tombent après la plantation (Pimienta Barrios, 1990 ; Singh, 2006). Cette dernière, peut être étendue à la moitié de l'été dans les zones avec des hivers doux. L'idée est que les plantes s'installent bien et survivent aux conditions hivernales plus froides. Cependant, la plantation d'automne est recommandée au Maroc (Nasr et Jamjoum, 2002 ; Nasr, 2015) et en Jordanie (Homrani Bakali, 2013), où elle donne un système racinaire bien établi en hiver, une forte croissance en été et une fructification plus précoce.

Soin des cladodes nouvellement plantés

Une ou deux irrigations légères (10 litres par plante) dans un petit réservoir en terre autour de la plante favorise le développement des racines mais on doit prendre soin

de ne pas irriguer en excès les jeunes plantes (Potgieter, 2001). Les cladodes nouvellement établis peuvent développer rapidement des fruits après la plantation. A cause de la forte demande en ressources que ces fruits ont sur la plante, il est préférable de les supprimer au cours de l'année de la mise en place (Wessels, 1988b ; Inglese, 1995). En première année de production, une petite quantité de fruits peut être laissée à murir.

GESTION DU VERGER

Contrôle des adventices

Alors que les figuiers de Barbarie sont bien adaptés aux régions arides et semi-arides et peuvent survivre à des conditions de sécheresse sévère, on a montré que le contrôle des adventices améliorerait la productivité (Felker et Russel, 1988), spécialement dans les jeunes plantations (Inglese *et al.*, 1995a). La sensibilité de la plante à la concurrence des adventices est due à un système racinaire très superficiel (Felker et Russel, 1988 ; Snyman, 2005), qui entre en compétition, avec les adventices, pour les nutriments et l'eau dans le même horizon de sol. Nobel et De la Barrera (2003) ont montré que 95% des racines des figuiers de Barbarie matures se développent dans une profondeur de sol de 40-470 mm, alors que Snyman (2006a) rapporte que les racines peuvent se répandre jusqu'à 2.5 m autour de la tige de la plante en 2 ans. Diverses méthodes de contrôle des adventices peuvent être utilisées mais le travail du sol devrait être restreint le plus possible pour éviter d'endommager le système racinaire superficiel (Inglese, 1995). Le contrôle des adventices est plus performant quand il est fait à un stade de développement précoce, quand la compétition avec la culture de figuier de Barbarie est minimale (Wessels, 1988a ; Inglese, 1995).

Contrôle chimique des adventices

A cause du coût élevé de la main d'œuvre, le contrôle chimique des adventices est la norme pour la production commerciale de fruits. Une gamme d'herbicides peut être utilisée mais les agriculteurs sont exhortés à n'utiliser que les produits qui sont homologués dans leurs pays respectifs, spécialement quand les fruits sont destinés à l'exportation. Les adventices devraient de préférence être contrôlées jusqu'à 1-1.5 m de chaque côté des rangs (Potgieter, 2001) ; là où le danger d'érosion du sol est limité, un contrôle total des adventices peut être réalisé (Brutsch, 1979 ; Felker *et al.*, 2005). Du fait que les jeunes pousses de figuier de Barbarie sont extrêmement sensibles aux herbicides, la pulvérisation devrait être évitée les jours de vent. Là où les sections basses du tronc contiennent de la chlorophylle, les tiges devraient être protégées pour prévenir les dommages des herbicides.



Contrôle mécanique des adventices

Dans les systèmes de plantation en haies, un contrôle des adventices dans le rang avec des moyens mécaniques est préférable quand les plants de figuier de Barbarie sont jeunes à cause de leur sensibilité aux herbicides (Potgieter, 2007). Cependant, dans les systèmes de plantation au carré avec des plantes isolées taillées en sphères, le contrôle des adventices reste manuel car cette méthode de taille rend difficile le travail entre les arbres avec des outils mécaniques ordinaires (Inglese et Barbera, 1993). Dans les systèmes agricoles plus petits ou plus traditionnels avec un accès limité aux herbicides, le sol entre les rangs peut être labouré pour détruire les adventices du champ (Nasr, 2015 ; Tudisca *et al.*, 2015). Bien que le contrôle mécanique des adventices ne soit pas idéal, il est préférable à l'absence de tout contrôle des adventices (Felker et Russel, 1988).

Bandes enherbées permanentes

Quand les vergers sont plantés le long d'une pente, il est recommandé de maintenir une bande enherbée régulièrement tondue entre les rangs pour éviter l'érosion du sol (Potgieter, 2001). Les adventices peuvent être tondues et laissées à la surface du sol comme mulch pour retenir l'humidité et réduire la croissance des adventices (Inglese, 1995).

Systèmes de taille et de formation

La sélection d'un système approprié de taille et de formation du figuier de Barbarie est très liée au système de plantation, à la disposition et à l'espacement choisi dans la phase de planification. La raison principale de la taille des figuiers de Barbarie est d'assurer l'interception maximale de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) par les cladodes terminaux. La plupart des cladodes terminaux exposés à un ensoleillement adéquat produiront des bourgeons floraux (Nerd et Mizrahi, 1995b), alors que les cladodes ombragés sont généralement peu productifs voire infertiles (Wessels, 1988a ; Pimienta Barrios, 1990 ; Inglese *et al.*, 2010). Par conséquent, pour assurer une assimilation élevée du CO₂ et une bonne fertilité du cladode, il est important d'éviter l'ombrage excessif des cladodes (Pimienta Barrios, 1990 ; Inglese *et al.*, 1994a) particulièrement pendant les huit dernières semaines avant le débourrement floral du printemps (Barbera *et al.*, 1993a ; Cicala *et al.*, 1997). Les autres bénéfices de la taille comprennent : le contrôle de la hauteur de la plante, la formation de la plante en haie, l'augmentation du rendement et l'amélioration de la grosseur des fruits, une détection et un contrôle plus facile des ravageurs, une récolte plus aisée et le rajeunissement des vieilles plantes (Hester et Cacho, 2003 ; Inglese *et al.*, 2009, 2010). Entre 20 et 50% des cladodes terminaux devraient être supprimés par la taille (Oelofse *et al.*, 2006). Cependant, une

taille excessive va réduire le rendement et contribuer à une forte croissance végétative la saison suivante (Inglese *et al.*, 2002b). Tous les cladodes malades, petits ou endommagés devraient être supprimés.

Taille de formation

La taille de formation commence la première année de la mise en place et est suivie par la taille de production quand les plantes commencent à fructifier (Targa *et al.*, 2013 ; Nasr, 2015). L'objectif de la taille de formation est de diriger la croissance végétative vers la forme désirée. Dans les pays où les haies à haute densité sont utilisées, les plantes sont taillées en forme pyramidale (Potgieter, 2001). Là où les systèmes de plantation carrée avec des espacements plus larges sont fréquents, les plantes sont formées en vase ou en globe (Inglese, 1995). Ces plantes n'ont pas de tige principale, donnant une plante large avec un grand nombre de cladodes terminaux distribués autour de la partie extérieure de la canopée (Inglese *et al.*, 2002a).

Taille de production

La taille de production est utilisée pour maintenir un bon équilibre entre la croissance végétative et reproductive avec un nombre adéquat de nouveaux cladodes terminaux pour la floraison de l'année suivante (Mulas et D'Hallewin, 1992). Les conditions environnementales, le comportement de croissance du cultivar et l'écart entre les plantes affectent tous la densité de la canopée (Inglese *et al.*, 2002a). La réduction de la densité de la canopée par la taille facilite les travaux du verger (par exemple l'éclaircissage, la scozzolatura, la récolte) et contribue à l'amélioration de la qualité du fruit (Inglese *et al.*, 2002a, 2010). La hauteur des plantes ne devrait pas de préférence excéder 1.8 m de manière à éviter l'utilisation d'échelles pour les travaux du verger (Potgieter, 2001 ; Nasr, 2015).

Taille de renouvellement

Dans le cas de vieilles plantations de figuiers de Barbarie, la sénescence de la canopée et la réduction du rendement avec une alternance de production sont fréquentes (Mulas et D'Hallewin, 1992). Le rajeunissement des vieilles plantes peut être obtenu en rabattant les plantes à 0.5 m au-dessus du sol. Seules 3-4 branches charpentières principales bien espacées devraient être laissées pour le développement de la nouvelle plante. Pour éviter les brûlures du soleil, la plante entière devrait être peinte avec de la peinture blanche à base d'alcool polyvinylique, mélangée 1 : 1 avec de l'eau. Avec un grand système racinaire déjà établi, la plante reprend sa fructification dans les 2-3 ans après la taille de renouvellement (Wessels, 1988b ; Mulas et D'Hallewin, 1992). Les nouveaux cladodes qui se développent doivent être éclaircis pour éviter leur surcharge.

Taille d'été

Une suppression totale des nouveaux cladodes en dé-



veloppement au printemps est une pratique commune en Sicile pour réduire la compétition entre la croissance végétative et celle des fruits. Cependant, cette pratique peut avoir pour conséquence un comportement de fructification alterné (Inglese et Barbera, 1993; Inglese *et al.*, 2002b). La taille d'été n'est pas recommandable dans les zones avec des hivers froids, parce que les cladodes se développant tardivement dans la saison n'auront pas suffisamment de temps pour s'endurcir avant l'hiver, le moment où ils seront sujets aux dégâts du gel (Wessels, 1988b). Cependant, en Afrique du Sud, l'éclaircissage d'une partie de l'excès de cladodes, en développement au printemps et au début de l'été, est réalisé. Les nouveaux cladodes qui se développent près des bourgeons floraux peuvent causer des frictions sur l'épiderme du fruit, le rendant non-commercialisable à cause des dommages esthétiques (Wessels, 1988b ; Potgieter, 2001).

Le meilleur moment pour tailler est après la récolte des fruits mais avant les deux mois précédant l'éclosion des bourgeons floraux (Wessels, 1988b). Une taille tardive, spécialement sur les arbres surchargés, a pour conséquence que les cladodes ne reçoivent pas un PAR suffisant pour les rendre fertiles. En Afrique du Sud, la taille se fait entre avril et juillet (automne/hiver), quand la plante ne croît plus activement (Wessels, 1988c ; Potgieter, 2001). De même, au Mexique, Pimienta Barrios (1986, 1990) suggère une taille de novembre à mars (hiver).

Fertilisation

Des déficiences en nutriments minéraux affectent le métabolisme du figuier de Barbarie et ont un impact négatif sur la qualité et le rendement des fruits (Nerd et Mizrahi, 1992; Zegbe Dominguez *et al.*, 2014). Pour établir des recommandations de fertilisation pour le figuier

de Barbarie, il est essentiel de considérer l'équilibre en nutriments de la plante dans les cladodes terminaux et aussi les réserves de nutriments disponibles dans le sol.

Les résultats à propos de la nutrition des plantes en lien avec le rendement et la qualité des fruits de figuier de Barbarie sont très inconsistants et contradictoires faisant des recommandations de fertilisation, un défi. Les figuiers de Barbarie diffèrent physiologiquement et morphologiquement de la plupart des autres plantes cultivées ; pour ces raisons les recommandations de fertilisation appliquées à d'autres cultures sont peu utiles (Nobel, 1983, 1988 ; Magallanes Quintanar *et al.*, 2006). En absence d'accord sur la fertilisation du figuier de Barbarie, le **Tableau 3** fournit aux producteurs des normes larges et provisoires d'analyses des tissus de plante et de sol, alors que le **Tableau 4** établit des instructions générales de fertilisation là où les résultats d'analyses de sols ne sont pas disponibles.

Les recherches en nutrition minérale sur le figuier de Barbarie dans divers pays montrent que l'application d'engrais, organiques ou inorganiques, est généralement bénéfique en production de fruits. Les éléments nutritifs influencent la phénologie végétative et reproductive, le rendement et la qualité des fruits chez le figuier de Barbarie, les macroéléments ayant le plus grand effet sur la production de fruits (Zegbe Dominguez *et al.*, 2014 ; Arba *et al.*, 2015b). De tous les nutriments de la plante, N est l'élément le plus limitant chez les cactus (Nobel, 1983) avec des valeurs de N les plus élevées dans les jeunes cladodes fertiles (Nobel, 1988). Cependant, des concentrations en N très élevées (> 2.2%) dans les cladodes de 2 et 3 ans peuvent engendrer une croissance végétative excessive accompagnée de coûts d'intrants plus élevés, d'une réduction de la fertilité des cladodes, d'un faible développement de la couleur des fruits et d'une matura-

TABLEAU 3 Normes provisoires dans les tissus de plante et du sol pour la production de figues de Barbarie

Paramètre du sol	Norme	Cladode terminal	Norme (% MS)
pH (eau)	6.5-7.5	N	^b
P (mg kg ⁻¹)	20-30	P	0.1-0.3
K (mg kg ⁻¹) ^a	80-100	K	1.5-4.0
Ca (mg kg ⁻¹)	> 400	Ca	2.0-4.5
Mg (mg kg ⁻¹)	100-150	Mg	1.0-1.5
Na (mg kg ⁻¹)	< 200	Na	0.02-0.03
Mn (mg kg ⁻¹)	30-70		
Ca/N	4.0		
K/N	3.4		
N/P	4.5		
Ca/Mg	3.0		

^a Si (Ca + Mg)/K > 8 (sols sableux) ou < 5 (sols argileux), appliquer du K.

^b Arbres jeunes (0-2 ans) : 0.6-0.8%. Arbres matures (≥ 3 ans) : 0.9-1.3%.



TABLEAU 4 Recommandations provisoires de fertilisation pour la production de fruits là où aucun résultat d'analyse de sol n'est disponible (quantité de nutriments pour les plantes en kg ha⁻¹ an⁻¹)

Élément nutritif	Année 1	Année 2	Année 3	> Année 4
N	50	50	70	100
P	10	10	20	30
K	20	20	30	50
Mg	10	10	20	40

tion irrégulière (Potgieter et Mkhari, 2000; Inglese *et al.*, 2002a). Les concentrations rapportées de P et K dans les tissus de la plante varient de 0.06 à 0.3 et 0.06 à 3.5%, respectivement (Nobel, 1983, 1988 ; Arba *et al.*, 2015b). Le Ca et le K sont les éléments minéraux les plus abondants dans les cladodes, potentiellement plus abondants que N (Galizzi *et al.*, 2004). De plus, le Mg dans les jeunes cladodes peut atteindre des niveaux de 1.47% (Magallanes Quintanar *et al.*, 2006). Par conséquent, N, P, K, Ca et Mg sont tous potentiellement des facteurs limitants dans la production de figes de Barbarie s'ils sont cultivés dans des sols déficients en nutriments (Magallanes Quintanar *et al.*, 2006). La concentration en éléments dans les cladodes est affectée par la charge de fruits, la position du cladode, l'âge de la plante, le tissu de la plante analysé et la saison (Nerd et Nobel, 1995 ; Gugliuzza *et al.*, 2002a).

Pour le figuier de Barbarie, une floraison additionnelle peut être induite avec l'application de N juste après la suppression de la récolte d'été. Selon Nerd *et al.*, (1993b), le nombre de bourgeons floraux augmente avec l'augmentation du niveau de N jusqu'à 120 kg N ha⁻¹, alors que la concentration de N dans les tissus du cladode est positivement corrélée au nombre de fleurs formées. Nerd et Mizrahi (1995b) ont trouvé que la floraison d'automne est plus importante pour les jeunes plantes (< 6 ans) que pour les vieilles plantes. Cependant, des systèmes de production à haut rendement avec deux récoltes de fruits en une année sur la même plante peuvent avoir des besoins supplémentaires en nutriments (Groenewald, 1996).

A cause de la synergie entre la fertilisation et l'irrigation, l'application d'engrais devrait être réalisée quand il y a les précipitations adéquates ou quand l'irrigation est disponible (Nerd *et al.*, 1989 ; Mondragón Jacobo, 1999). Dans les pays avec un climat méditerranéen, la fertilisation est appliquée en hiver (Barbera *et al.*, 1992a ; Inglese, 1995) avec de la fertigation appliquée pendant toute l'année en Israël (Nerd *et al.*, 1991b). Nerd *et al.* (1989, 1991b) et Ochoa et Uhart (2006c) ont rapporté que l'application d'engrais NPK en hiver augmente la production de bourgeons floraux au printemps suivant. Cependant, selon García de Cortázar et Nobel (1991), le meilleur moment

pour appliquer des engrais est au cours des mois les plus chauds car il y a une densité de flux de photons photosynthétiques (DFPP) plus élevée en été. Au Mexique, la moitié du N et la totalité de P et le K sont apportés avec l'irrigation au début du débourrement floral et l'autre moitié du N est appliquée après la récolte (Zegbe Dominguez *et al.*, 2014). En agriculture pluviale (précipitations estivales), la moitié de N et K et tout P peuvent être épandus directement après la récolte des fruits et le reste vers la fin mars (Wessels, 1988b), le chaulage peut être réalisé à n'importe quel moment de l'année, mais de préférence au moins un mois après la fertilisation azotée (Claassens et Wessels, 1997).

Irrigation

La tolérance exceptionnelle à la sécheresse et le WUE (Efficacité d'Utilisation de l'Eau) élevé du figuier de Barbarie (Han et Felker, 1997 ; Zegbe-Dominguez *et al.*, 2015) sont les premières raisons pour sa popularité en tant que culture pluviale dans beaucoup de zones du monde avec de faibles précipitations et un manque d'eau d'irrigation. Bien que la plante puisse survivre dans des zones recevant 200 mm an⁻¹ (Acevedo *et al.*, 1983), la gamme optimale de précipitation pour la production de figes de Barbarie est de 400-600 mm an⁻¹, mais le type de sol joue aussi un rôle dans les besoins réels de la plante en eau (Le Houérou, 1992, 1994). Bien que des rendements considérables de fruits puissent être atteints avec de faibles précipitations, en conditions pluviales (Potgieter, 2007), l'irrigation complémentaire des figuiers de Barbarie est recommandée dans les zones de précipitations estivales recevant moins de 300 mm an⁻¹ (Mulas et D'Hallewin, 1997; Van der Merwe *et al.*, 1997). De plus, l'irrigation est avantageuse pendant les périodes climatiques défavorables - telles que les périodes sèches au cours de la saison des pluies ou quand les pluies de printemps sont en retard - (Wessels, 1988d). Dans les climats méditerranéens où la majeure partie des précipitations arrivent en hiver, l'irrigation complémentaire en été est indispensable pour des rendements élevés et une bonne qualité (Mulas et D'Hallewin, 1997; Homrani Bakali, 2013). L'irrigation du figuier de Barbarie est donc une pratique commune en Italie, en Israël, en Jordanie, au Maroc, au Chili et dans les zones à précipitations hivernales d'Afrique du Sud.



L'irrigation complémentaire du figuier de Barbarie a surment des avantages, spécialement pendant certaines phases critiques de la croissance et du développement de la plante. García de Cortázar et Nobel (1992), Mulas et D'Hallewin (1997) et Liguori *et al.* (2013b) ont tous rapporté les effets bénéfiques de l'irrigation sur la croissance végétative de la plante, le nombre de cladodes et la taille de la canopée. Le rendement de fruits par plante est généralement plus important pour les plantes irriguées que les non-irriguées et les chercheurs ont attribué la supériorité de ce rendement au plus grand nombre de fruits en moyenne par cladode plutôt qu'à une augmentation de la taille du fruit (Mulas et D'Hallewin, 1997; Mondragón Jacobo *et al.*, 1995).

Selon Nerd *et al.* (1989), des retards dans l'irrigation pendant l'hiver quand les précipitations annuelles sont inférieures à 300 mm engendrent une réduction substantielle de la fertilité du cladode et une production hors saison en hiver. Le manque d'eau, particulièrement pendant la PDF, peut affecter négativement la qualité des fruits. L'application de 2-3 irrigations de 30-50 mm chacune pendant la PDF augmente la taille du fruit et la proportion de pulpe de la figue de Barbarie (Barbera, 1984, 1994 ; Zegbe Dominguez *et al.*, 2015). Cependant, l'irrigation seule ne peut pas compenser la réduction de la taille du fruit quand il y a un grand nombre de fruits par cladode, rendant l'éclaircissage des fruits indispensable pour atteindre un bon calibre du fruit (La Mantia *et al.*, 1998 ; Gugliuzza *et al.*, 2002a).

Nobel (1995) remarque qu'à peine 10 mm de pluie sont suffisants pour mouiller le sol dans la zone racinaire du figuier de Barbarie, rendant la plante capable d'utiliser efficacement de faibles quantités de précipitations. Wessels (1988b) note que grâce au système racinaire superficiel de la plante, l'apport de 20-25 mm d'irrigation à la fois devrait être adéquat. Il y a peu d'informations sur les paramètres du champ pour une planification appropriée de l'irrigation, la quantité et le moment de l'apport d'eau varient substantiellement entre les pays (Felker et Inglese, 2003). Récemment, Consoli *et al.* (2013) ont déterminé un coefficient cultural (Kc) pour le figuier de Barbarie dans un intervalle de 0.5 à 0.6. L'irrigation au goutte-à-goutte de 150-200 mm d'eau par an semble adéquate pour la récolte principale d'été en Argentine alors que 4-5 irrigations par an sont appliquées pour une récolte de *scozzolatura* (Ochoa et Uhart, 2006a). Gugliuzza *et al.*, (2002b) rapportent que 2-3 irrigations (60-100 mm) appliquées pendant la PDF augmentent la productivité et améliorent la qualité des fruits, alors que deux applications de 50-80 mm d'eau pendant la PDF sont essentielles pour atteindre le calibre pour l'exportation des fruits en récolte de *scozzolatura* (Inglese *et al.*, 1995a). Selon Homrani Bakali (2013), 3 et 6 irrigations par an produisent plus de fruits que juste une par an au Maroc. En Afrique du Sud, Haulik (1988) suggère moins de 3 irrigations complémentaires

par an : en commençant en août pour stimuler la pousse reproductive, puis à l'anthèse et de nouveau aux premiers stades de développement du fruit. Là où la *scozzolatura* est pratiquée la première irrigation est apportée à l'induction florale (40 jours avant le débourrement), la suivante après la floraison, puis moins de cinq semaines après la nouaison et pendant la maturation du fruit (Targa *et al.*, 2013).

Différents systèmes d'irrigation sont utilisés dans les vergers de figuier de Barbarie, le goutte-à-goutte et les micro-asperseurs sont communs dans les vergers modernes (Inglese, 1995). Les micro-asperseurs couvrant une surface de sol relativement grande en utilisant de petits volumes d'eau sont très adaptés au figuier de Barbarie au système racinaire superficiel et étendu (Potgieter, 2001 ; Snyman, 2004, 2005) et ils influencent positivement le calibre et la qualité du fruit (Inglese *et al.*, 2010). Bien que les méthodes traditionnelles d'irrigations telles que l'irrigation par inondation, peuvent être moins efficaces, de tels systèmes peuvent fournir une solution facile et économique pour les producteurs en manque d'argent si l'irrigation requise est limitée à 2-3 fois par saison (Wessels 1988b).

Le figuier de Barbarie est sensible aux sels dissous dans sa zone d'enracinement et par conséquent la qualité de l'eau d'irrigation doit être testée pour déterminer son aptitude à être utilisée. Nerd *et al.*, (1991c) recommandent que le NaCl dans l'eau d'irrigation pour le figuier de Barbarie n'excède pas 25 mol m⁻³ pour éviter les problèmes de salinité. La récupération de l'eau et le mulch pour augmenter la productivité du figuier de Barbarie sont des stratégies agricoles sensées qui peuvent être utilisées dans les zones arides ayant des possibilités limitées, pour irriguer et pour conserver l'eau du sol. Mondragón Jacobo (1999) a montré que là où des diguettes sont faites pour retenir l'eau dans l'espace de l'entre-rang, une grande part du ruissellement est évitée, laissant plus d'eau disponible pour les plantes et engendrant des rendements plus élevés.

Eclaircissage des fruits

La taille du fruit chez le figuier de Barbarie dépend de la disponibilité en eau (Barbera, 1984), des différences de cultivars (Potgieter, 2007 ; Zegbe Dominguez et Mena Covarubias, 2010b), de la longueur de la PDF (Barbera *et al.*, 1992a), de la nutrition minérale (Ochoa *et al.*, 2002) et, de manière plus importante, de la charge en fruits du cladode (Brutsch, 1992 ; Inglese *et al.*, 1995a). Contrairement à de nombreuses autres cultures fruitières, très peu de fleurs de figuier de Barbarie tombent et 95% des fleurs émises deviennent des fruits, à moins qu'elles soient endommagées par des gels tardifs. Cependant, si la charge en fruits n'est pas réduite par éclaircissage, la taille individuelle des fruits est faible et des branches entières et des cladodes peuvent aussi rompre sous leur poids excessif. Les prix des fruits sur les marchés locaux et à l'export dépendent généralement de la taille du fruit, les plus gros fruits se vendant à un



prix plus élevé. Cependant, un éclaircissage fort, réduisant à 4 le nombre de fruits par cladode peut réduire substantiellement (jusqu'à 58%) le rendement total en fruits, sans aucune augmentation de taille des fruits et peut même causer une seconde floraison (Zegbe Dominguez et Mena Covarrubias, 2010a). Selon Brutsch (1992), les cladodes éclaircis produisent de plus gros fruits que les cladodes non éclaircis, quel que soit le nombre de fruits par cladode. Donc, une bonne taille de fruit est atteinte avec un grand nombre de nouaison par cladode suivi par un éclaircissage des fruits au bon moment pour réduire la charge.

En plus d'un poids unitaire de fruit plus élevé (Inglese *et al.*, 1995a ; Nasr, 2015), l'éclaircissage a d'autres **avantages** :

- Une récolte plus facile (Wessels, 1989) ;
- Il évite que les branches cassent à cause de la lourde charge en fruits (Wessels, 1988a) ;
- Il réduit l'alternance de la fructification (Wessels, 1988b ; Hester et Cacho, 2003) ;
- Une maturation régulière et plus précoce (Inglese *et al.*, 2002b) ;
- Une augmentation des solides solubles totaux (SST) ;
- Une proportion plus élevée de fruits de première classe (Zegbe Dominguez et Mena Covarrubias, 2009, 2010a, b).

L'éclaircissage peut se faire dès que les bourgeons sphériques des fruits sont distinguables des bourgeons végétatifs allongés (Wessels, 1988) mais avant 3 semaines après l'anthèse, puisqu'un éclaircissage plus tardif n'améliore pas la taille du fruit (Inglese *et al.*, 1995b ; La Mantia *et al.*, 1998 ; Gugliuzza *et al.*, 2002a).

Les recherches ont montré que l'on peut produire des fruits de taille adaptée à l'exportation (> 120 g) seulement si l'on conserve au plus 6 fruits par cladode (Inglese *et al.*, 1994b). Puisque tous les cladodes ne sont pas de la même taille, la norme dans le secteur commercial sud-africain est d'éclaircir les fruits pour avoir approximativement 50-70 mm d'espacement entre les jeunes fruits, plutôt qu'un nombre spécifique par cladode (Potgieter, 2001). Laisser un espace adéquat entre les fruits en développement assure une réduction des dommages sur les fruits adjacents pendant le processus de récolte, tout particulièrement si des sécateurs spécifiques de récolte sont utilisés. Les fruits qui se développent sur la face plane du cladode doivent être retirés puisqu'ils tendent à avoir une longue « queue de fruit », rendant l'emballage plus difficile. Les fruits excédentaires peuvent être retirés à la main en utilisant un gant en polychlorure de vinyle (PVC) et un couteau aiguisé ou un sécateur de taille.

Culture hors-saison

L'induction florale chez la plupart des arbres à fruits pérennes est largement synchronisée, donnant une seule récolte à un moment spécifique de l'année (Liguori et

Inglese, 2015). Cependant, une des caractéristiques les plus remarquables du figuier de Barbarie est la capacité de la plante à refleurir à différents moments dans la même saison (Inglese, 1995 ; Inglese *et al.*, 2002a), naturellement ou après que des pratiques inductives aient été appliquées (Nerd et Mizrahi, 1997). Ces fruits hors-saison sont vendus à un prix substantiellement plus élevé que ceux de la saison normale d'été (Mondragón Jacobo *et al.*, 2009). Une application réussie des techniques de manipulation de la récolte, telle que *scozzolatura* et la production d'hiver, a considérablement élargi l'approvisionnement en fruits de 5 à 9 mois de l'année sur les marchés de produits locaux frais d'Afrique du Sud, bien que le volume soit limité de mai à septembre. Néanmoins, la mise en marché des figues de Barbarie est généralement très saisonnière, avec des cultivars disponibles pour environ 4 mois par saison (Inglese, 1995 ; Liguori et Inglese, 2015). **L'accroissement de la disponibilité des fruits** sur les marchés pourrait être atteint par :

- La culture de figuiers de Barbarie dans diverses zones agroclimatiques (Mondragón Jacobo *et al.*, 2009 ; Liguori et Inglese, 2015) ;
- L'utilisation de cultivars avec des périodes de maturation différentes (Brutsch, 1992 ; Gallegos Vazques *et al.*, 2006) ;
- L'amélioration de la technologie post-récolte (Liguori et Inglese, 2015) ;
- L'adoption de techniques de manipulation de la récolte (Barbera *et al.*, 1992a ; Brutsch and Scott, 1991).

Scozzolatura

La technique de la *scozzolatura* - découverte par chance au début du dix-neuvième siècle (Coppoler, 1827, cité par Barbera *et al.*, 1991, 1992a) - est depuis devenue une pratique standard pour l'industrie de la figue de Barbarie en Italie (Barbera, 1995). Une élimination totale de toutes les nouvelles fleurs et nouveaux cladodes de la pousse de printemps engendre une deuxième floraison approximativement 12-16 jours après avec une maturation des fruits 6 à 8 semaines plus tard que la pousse de printemps (Barbera *et al.*, 1988, 1991, 1992b ; Brutsch et Scott, 1991). Bien que la deuxième pousse donne normalement moins de fleurs que celle de printemps, les fruits sont mis en marché quand les prix sont plus élevés (Brutsch et Scott, 1991 ; Barbera et Inglese, 1993 ; Boujghagh et Bouharroud, 2015), ce qui, dans une certaine mesure, compense le rendement plus faible. La *scozzolatura* a de nombreux **avantages**, dont :

- De meilleurs prix ;
- Une meilleure qualité de fruits - en particulier, un calibre amélioré, un ratio graine/pulpe plus faible et une proportion de pulpe plus élevée (Barbera *et al.*, 1992b ; Hammami *et al.*, 2015 ; Boujghagh et Bouharroud, 2015) ;
- Une plus grande fermeté et une coloration plus intense de la pulpe (Mondragón Jacobo *et al.*, 1995) ;



- Une architecture de la plante plus complexe et plus compacte avec des cladodes terminaux plus fertiles et un rendement en fruits plus élevé (quand appliquée dès le plus jeune âge de la plante).

L'index de refloweraison, défini par le ratio du nombre de fleurs de la seconde floraison sur celui de la première (FI/Fl), peut grandement varier en fonction du moment de la suppression de la pousse de printemps (SPP) et des conditions environnementales lors de la suppression (Inglese, 1995). Le nombre de cladodes produits par la *scozzolatura* peut être 10 à 40% plus faible que celui de la pousse de printemps et le rendement en fruits peut être jusqu'à 50% plus bas que celui de la saison d'été (Nerd *et al.*, 1991b; Inglese, 1995). En effet, la *scozzolatura* peut aussi avoir des **désavantages**, incluant :

- Un rendement réduit ;
- Une proportion de peau plus élevée (Mondragón Jacobo *et al.*, 1995) - probablement due aux températures réduites pendant la PDF (Inglese, 1995 ; Hammami *et al.*, 2015) ;
- Des plus faibles SST ;
- Une augmentation des fissurations de la peau ;
- Moins d'acides titrables ;
- Des fruits faiblement colorés (Inglese, 1995 ; Mulas, 1997).

Au maximum 25% des cladodes de la pousse de printemps devraient être gardés sur la plante après la *scozzolatura*, puisqu'une proportion plus élevée réduit le taux de floraison du printemps suivant et favorise les fructifications biennales (Inglese *et al.*, 2002b, 1994a).

Les conditions climatiques, la réponse du cultivar et le moment de suppression de la pousse sont des facteurs importants qui affectent la *scozzolatura*. Les conditions environnementales au moment de la suppression influencent le degré de refloweraison et peuvent causer une forte variation annuelle de la réponse de refloweraison (Barbera *et al.*, 1991 ; Nieldu et Spano, 1992). Par exemple, un taux plus faible de refloweraison peut être obtenu si des températures élevées coïncident avec l'initiation des bourgeons qui va engendrer plus de bourgeons végétatifs que de bourgeons reproductif (Nerd *et al.*, 1989 ; Nobel et Castaneda, 1998). Dans certains pays, la *scozzolatura* est appliquée avec de l'irrigation (Inglese *et al.*, 2002a) et de la fertilisation azotée (Flores Valdez, 2003), ou le producteur peut appliquer une unique fertigation à la SPP (Nerd *et al.*, 1993b). Il est essentiel de sélectionner les cultivars les plus adaptés à la technique puisque la refloweraison peut être faible voire absente pour certains cultivars (Mondragón Jacobo, 2001 ; Targa *et al.*, 2013). Le moment de la SPP affecte l'ampleur de la refloweraison, le moment de maturation et les caractéristiques du fruit (Barbera *et al.*, 1992b). Inglese (1995) signale des taux de refloweraison de 0.7 pour une suppression des fleurs

avant l'anthèse et de 0.5-0.3 pour une suppression après l'anthèse. Une suppression avant la floraison produit le taux le plus élevé de refloweraison (Brutsch et Scott, 1991), mais le dernier stade de suppression donne normalement les retours économiques les plus élevés, bien que le rendement en fruits puisse être plus faible que pour les autres moments de SPP (Mulas, 1992; Boujghagh et Bouharroud, 2015). En dehors de l'Italie (Barbera *et al.*, 1991), la *scozzolatura* est aussi régulièrement pratiquée en Afrique du Sud (Brutsch et Scott, 1991), au Maroc (Boujghagh and Bouharroud, 2015) et en Tunisie (Aounallah *et al.*, 2005 ; Hammami *et al.*, 2015). Dans les autres parties du monde, la *scozzolatura* a donné de mauvais résultats. Par exemple, la *scozzolatura* dans les conditions mexicaines avec 'Cristalina' et 'Reyna' a donné des résultats négatifs (Mondragón Jacobo *et al.*, 1995) ; de la même manière, Ochoa *et al.*, (2009) ont rapporté un très faible index de refloweraison de 0.05 en Argentine avec 'Amarilla sin espinas'.

Après la *scozzolatura* réalisée par la SPP, le processus peut être répété avec la suppression complète des cladodes et des fruits de la première *scozzolatura* (Inglese *et al.*, 2010). Liguori *et al.* (2006) ont démontré que la double suppression des nouveaux fruits et cladodes induisait une troisième pousse de fleurs et de cladodes à la fin du mois d'août avec une production de fruits mûrissant, dans l'hémisphère nord, en hiver (janvier à mars). Les fruits d'hiver obtenus par la double *scozzolatura* et couverts par un film de PVC en fin d'automne ont une taille et une proportion de chair normale mais un taux légèrement plus faible des SST. Cependant, le taux de la seconde refloweraison était faible (20-40%) (Liguori et Inglese, 2015). Les basses températures de décembre ont arrêté la croissance et la maturation du fruit ; pour que les fruits se développent normalement, il est nécessaire de couvrir les plantes avec des tunnels en PVC (Liguori *et al.*, 2006).

Production de fruits en hiver

La floraison des figuiers de Barbarie n'est pas restreinte au printemps. Un plus faible débourrement se produit naturellement en Argentine (Inglese, 1995), en Californie (Curtis, 1977) et au Chili (Sudzuki Hills *et al.*, 1993), ainsi que dans les zones chaudes subtropicales de Limpopo en Afrique du Sud (Groenewald, 1996 ; Potgieter, 2001). En plus du débourrement naturel hors saison dans les zones avec des hivers doux, une seconde floraison peut être obtenue : Nerd *et al.*, (1993b) et Nerd et Mizrahi (1994) ont montré qu'après la récolte principale d'été, une application immédiate de l'irrigation et de N à une dose de 120 kg ha⁻¹ produisait un débourrement d'automne ; la production de bourgeons floraux augmentait avec l'augmentation de la dose d'application de N et était fortement corrélée avec la teneur réduite en N soluble dans les cladodes terminaux (Nerd et Mizrahi, 1994).

Bien que les récoltes d'hiver donnent des rendements 50



à 80% plus faibles que la récolte principale d'été (Nerd et al., 1993b), des prix plus élevés sont obtenus (Mondragón Jacobo et Bordelon, 1996). Groenewald (1996) ont rapporté que même sans irrigation, ces techniques peuvent être appliquées avec succès dans les conditions pluviales telles que dans les zones de précipitations estivales d'Afrique du Sud.

De plus, la réponse de la floraison à l'azote est affectée par l'âge des plantes. La production de bourgeons floraux est plus élevée chez les jeunes plantes (≤ 6 ans) que chez les plus vieilles plantes (Nerd et Mizrahi, 1994). Cependant, cette technique est seulement faisable là où les températures hivernales sont suffisamment élevées pour le développement du fruit (Nerd et al., 1993b). Le ratio peau/pulpe est plus élevé dans les fruits d'hiver que dans les fruits d'été, à cause d'une peau plus épaisse (Nerd et al., 1993b ; Groenewald, 1996). Les producteurs devraient prendre note que les cultivars produisant de forts rendements en fruits en été (par exemple 'American Giant') ne répondent pas du tout à l'application de N (Groenewald, 1996). De plus, la taille doit être reportée au-delà de la maturation des fruits d'hiver, moment où les bourgeons floraux de la récolte principale d'été sont déjà apparus, rendant la taille difficile (Groenewald, 1996).

Assainissement du verger

Le rendement fruitier du figuier de Barbarie est extrêmement irrégulier et les rendements varient grandement, non seulement au sein des pays et entre pays, mais aussi au sein des vergers d'un même cultivar. Les rendements en fruits varient de 1-5 tonnes ha^{-1} avec des méthodes traditionnelles à 15-30 tonnes ha^{-1} avec des pratiques intensives dans des conditions pluviales avec 400-600 mm par an (Monjauze et Le Houérou, 1965a). Le rendement en fruits est relativement faible dans la plupart des plantations du Mexique (2-8 tonnes ha^{-1} – Pimienta Barrios, 1990, 1994) ; pourtant, certains vergers irrigués peuvent produire 25 tonnes ha^{-1} (Gallegos Vazques et al., 2009). Au Chili, les rendements en fruits sont généralement faibles (6-9 tonnes ha^{-1} - Saenz, 1985) ; alors qu'en Argentine ils varient de 8-11 tonnes ha^{-1} (culture pluviale) à 22 tonnes ha^{-1} (culture irriguée) (Ochoa, 2003). Des rendements totaux dépassant les 50 tonnes ha^{-1} ont été signalés dans le Karoo en Afrique du Sud (Brutsch, 1979) et au Texas, aux Etats-Unis d'Amérique (Parish et Felker, 1997). Dans les autres zones pluviales d'Afrique du Sud, telles que la Province de l'Etat Libre, le rendement de fruits moyen le plus élevé obtenu était de 17.44 tonnes ha^{-1} dans un essai comparant 42 cultivars (Coetzer et Fouche, 2015). En Israël et en Italie, des rendements de 20-30 tonnes ha^{-1} sont régulièrement rapportés (Barbera et Inglese, 1993 ; Nerd et al., 1993b).

S'ils sont bien gérés, les vergers peuvent avoir une durée de vie de plus de 100 ans comme observé en Afrique

du Nord (Le Houérou, 1994). On s'attend à ce que le rendement en fruits augmente annuellement, depuis la plantation à approximativement la cinquième année de production quand les plantes ont atteint leur pleine maturité (Potgieter, 2007). La plupart des fleurs se développent sur les cladodes terminaux d'un an, alors que les nouveaux cladodes s'installent généralement sur les cladodes de deux ans ou plus (Inglese et al., 1994a ; Wessels, 1988a). La fertilité des cladodes dépend des conditions environnementales, de l'âge de la plante et de l'accumulation de matière sèche (MS) (García de Cortázar et Nobel, 1990 ; Inglese et al., 2002b ; Valdez Cepeda et al., 2013). Les cladodes avec une teneur de MS plus élevée que la moyenne tendent à produire plus de fruits (García de Cortázar et Nobel, 1992).

Les raisons possibles pour la forte variabilité des rendements en fruits reposent sur quatre domaines principaux : les conditions environnementales, les caractéristiques du génotype et leurs interactions, la conception et l'agencement du verger et les pratiques dans le verger (Nerd et al., 1991b; Inglese, 1995; Inglese et al., 2002a; Potgieter 2007).

Conditions environnementales

Contrairement à la croissance végétative, peu d'éléments sont connus à propos de l'influence des facteurs environnementaux sur la fertilité du cladode et le rendement en fruits chez le figuier de Barbarie (Inglese et al., 1995a ; Nerd et Mizrahi, 1995b). Selon Barbera et al., (1991), García de Cortázar et Nobel (1991), Nerd et Mizrahi (1995b) et Inglese et al., (2002a), la fertilité du cladode dépend des conditions environnementales telles que l'état hydrique de la plante, la température, la densité de flux de photons photosynthétiques (DFPP) et les éléments nutritifs du sol. Wessels (1989) a lié les **variations saisonnières du rendement en fruits à :**

- Des différences de conditions agroclimatiques (besoin de froid, précipitations, températures) ;
- Des différences dans la fertilité du sol ;
- Une faible pollinisation et fécondation due à l'absence de pollinisateurs et les conditions climatiques défavorables pendant la période de pollinisation (froid, pluie).

Potgieter (2007) a montré que les niveaux de P et de N du sol avaient la plus grande influence sur le rendement en fruits de 11 cultivars de figuiers de Barbarie. Il est aussi bien connu que plus d'une récolte peuvent être obtenues pour le même environnement par refloraison induite, naturellement ou artificiellement (Barbera et al., 1991; Brutsch and Scott, 1991; Nerd et al., 1993b; Sudzuki Hills et al., 1993).

Les caractéristiques du génotype et interactions

Brutsch (1979), Pimienta Barrios (1990, 1994) et Wessels (1988a, 1989) ont indiqué que les cultivars diffèrent



quant à la vigueur reproductive et la fertilité des cladodes. Selon Wessels (1989) et Pimienta Barrios (1990), cette **large variation de la productivité entre cultivars** est due :

- Aux inhérentes différences de fertilité génétique ;
- A la fertilité de la plante mère ;
- A la fertilité des cladodes de la plante mère.

D'autre part, la **variation au sein d'un cultivar** est due à :

- La variation de la fertilité de la plante mère ;
- Les différences de fertilité entre cladodes selon leur position sur la plante mère.

Selon Barbera (1995), les grandes variabilités dans le rendement de fruits du figuier de Barbarie sont dues à une compréhension insuffisante de **l'interaction plante x environnement**. Dans un essai en champ de 8 ans comparant 11 cultivars de figuier de Barbarie dans trois zones agroclimatiques différentes d'Afrique du Sud, Potgieter (2007) a montré qu'il y avait des différences significatives, pour le rendement en fruits et ses composantes, entre cultivars, différents environnements et entre les années de production. La variance observée de rendement en fruits était due premièrement au niveau de P du sol et deuxièmement à N appliqué. Les résultats de l'étude démontrent clairement que non seulement les facteurs environnementaux ont une nette influence sur le rendement en fruits mais qu'il y a une forte interaction entre les 11 cultivars testés et les conditions environnementales. Une adaptation forte du cultivar a été observée seulement sur un cultivar et l'aptitude au rendement de certains cultivars est plus une caractéristique génétique qu'une réponse à l'interaction G x E (Potgieter, 2007).

Conception et agencement du verger

La productivité en fruits du figuier de Barbarie peut être améliorée en augmentant le nombre de cladodes fertiles par plante et/ou en augmentant la population de plantes (Inglese *et al.*, 2002a). Des rendements de fruits extrêmement élevés à un jeune âge des plantes peuvent être obtenus avec une densité élevée de plantes. En Israël, l'espacement des plantes de 1.5 m sur le rang et 4 m entre les rangs (1 666 plantes ha⁻¹) augmente substantiellement le nombre de cladodes fertiles aux premiers stades de la vie du verger, avec des rendements en fruits de 18 tonnes ha⁻¹ rapportés pour des arbres de 4 ans (Nerd et Mizrahi, 1993). Selon Inglese *et al.*, (2002a), pour obtenir un rendement annuel de 20 tonnes ha⁻¹ - avec un poids moyen de fruits de 100-120 g et une fertilité de cladode de six fruits par cladode après éclaircissage - 28 000 - 30 000 cladodes fertiles par hectare sont nécessaires. Cela suppose 80-90 cladodes fertiles par plante sur des plantes indépendantes espacées de 6 x 5 m les unes des autres (335 plantes ha⁻¹) ou 28-30 cladodes fertiles par plante pour les haies à haute densité de plantation avec des plantes espacées de 5 x 2 m les unes des autres (1 000 plantes ha⁻¹) (Inglese *et al.*, 2002a). De

manière à poursuivre l'augmentation du rendement en fruits, il serait nécessaire d'accroître le nombre de cladodes fertiles plutôt que d'accroître la fertilité des cladodes (Inglese, 1995).

Pratiques du verger

De fortes variations dans le rendement en fruits sont régulièrement observées, même dans des vergers bien gérés du même cultivar (Potgieter, 2007). Les faibles rendements de fruits signalés au Mexique sont partiellement dus au fait qu'une grande proportion de producteurs n'utilise pas certaines pratiques culturales telles que la fertilisation et la taille donnant lieu à une faible croissance végétative et un faible rendement en fruits (Pimienta Barrios, 1994). En comparaison, les rendements relativement élevés obtenus en Sicile (14 tonnes ha⁻¹) sont principalement dus à l'irrigation, la fertilisation et l'éclaircissage (Tudisca *et al.*, 2015).

La fructification alternée ou biennale a été signalée sur le figuier de Barbarie (Brutsch, 1979 ; Pimienta Barrios, 1990) et c'est une des raisons pour expliquer les grandes différences dans les rendements annuels de fruits. Inglese *et al.*, (1995) et Brutsch (1979) ont noté que les **raisons possibles pour la fructification alternée** sont :

- Une taille inadaptée ;
- Des différences de cultivars ;
- L'âge de la plante ;
- La compétition entre la croissance florale et végétative ;
- Le moment de l'induction des bourgeons.

Néanmoins, les producteurs préfèrent un cultivar qui fructifie régulièrement - même s'il a un rendement plus faible - plutôt qu'un cultivar que fructifie beaucoup une année et faiblement l'année suivante, puisque ces fluctuations ont un sérieux impact économique qui affecte négativement le flux de trésorerie de l'entreprise (Potgieter et Smith, 2006; Potgieter, 2007). En effet, la compétition entre la croissance végétative et reproductive, ainsi que la réduction du nombre de nouveaux cladodes suivant la SPP, sont des sources potentielles de comportement de fructification alternée de la plante (Inglese *et al.*, 2002b). Bien que Barbera *et al.*, (1991) aient trouvé que les plantes à fructification alternée avaient le même nombre de cladodes d'un an dans les bonnes années comme dans les mauvaises, la plupart de ces cladodes étaient infertiles dans les conditions de *scozzolatura*. Des approches pratiques pour **réduire la fructification alternée** sont :

- D'adopter un système de taille approprié (García de Cortázar et Nobel, 1992);
- D'assurer un régime d'éclaircissage des fruits (Wessels, 1989 ; Hester et Cacho, 2003) ;
- D'éviter la *scozzolatura* et la production d'hiver dans les mêmes vergers tous les ans.



RÉCOLTE

La qualité est un facteur très important dans la production de fruits, puisque le consommateur préfère des fruits attractifs avec un bon goût et une valeur nutritionnelle et fonctionnelle élevée. La qualité globale est généralement plus élevée à la récolte ; elle décroît par la suite à des vitesses qui varient selon la génétique, les traitements pré-récoltes, les conditions environnementales, le degré de maturité à la récolte, les processus de manipulation, les traitements post-récoltes et les conditions de stockage et de distribution. La qualité globale inclue un jeu très complexe de caractéristiques qui ne sont pas toujours positivement corrélées : en fonction des consommateurs ciblés, du marché de destination et du temps de stockage planifié, l'importance des différents aspects qualitatifs varie. Quand les fruits mûrissent, leur valeur nutritionnelle, le parfum et le goût s'améliorent mais les mécanismes de défenses naturelles des tissus contre les pathogènes, la susceptibilité à certains désordres physiologiques et la durée de vie potentielle diminuent tous. Par conséquent - comme pour d'autres espèces (Crisosto et Valero, 2008) - pour la livraison directe des marchés locaux, la récolte devrait se faire quand la meilleure qualité de consommation est atteinte ; pour la livraison à des marchés distants, une récolte plus précoce est plus appropriée pour prolonger la durée de vie post-récolte.

De manière à identifier le meilleur moment de récolte, des index de maturité objective et subjective ont été développés, basés sur des facteurs tels que le cultivar, le pays de production, l'utilisation et la destination du fruit. Les index de maturité les plus populaires incluent :

- La proportion de coloration de la peau ;
- Les solides solubles totaux (SST) $\geq 13\%$;
- La fermeté de la pulpe (mesurée avec un piston de 8 mm) $\geq 8 \text{ kg cm}^{-2}$ (Pimienta Barrios, 1990 ; Barbera et al., 1992) ;
- Le niveau de sucres réducteurs situé à environ 90% de celui du fruit totalement mûr - cependant, pour certains cultivars les sucres réducteurs n'excèdent jamais 50% des sucres totaux (Pimienta Barrios et Mauricio, 1989) ;
- L'abscission des glochides ;
- L'aplatissement de la cavité florale du réceptacle ;
- La proportion de pulpe ;
- L'épaisseur de la peau et la facilité pour l'enlever ;
- La résistance de la peau à la manipulation physique (Cantwell, 1995).

Les figues de Barbarie sont particulièrement difficiles à récolter à cause de la présence d'épines et de glochides qui peuvent percer la peau et rentrer dans les yeux et les voies respiratoires. Les fruits sont donc récoltés le matin quand l'humidité est suffisamment élevée pour empê-

cher les glochides de se déloger et de flotter dans l'air. Des vêtements de protection (gants et lunettes de sécurité) devraient être fournis aux ouvriers. Malgré l'apparence coriace de la plante et ses aptitudes à supporter des conditions environnementales rudes, le fruit est très tendre et ne peut pas supporter un traitement brutal (Wessels, 1992a). Pour la plupart des cultivars, l'assouplissement physiologique de l'articulation connectant le fruit au cladode est faible au moment de la récolte et des blessures à l'extrémité de la tige sont inévitables si le fruit est récolté en le cassant, le tirant ou le tordant. De fait, pour les usages commerciaux, on doit utiliser un couteau, faire une coupure nette à la base du fruit et laisser attachée une petite partie du cladode. Les ouvriers collectent habituellement les fruits dans des paniers en plastique et les vident dans des caisses en plastique contenant 15-20 kg de fruits pour le transport vers le bâtiment d'emballage.

Les dommages physiques pendant la récolte et le transport peuvent réellement compromettre la qualité du fruit et sa durée de conservation et accroître la sensibilité du fruit à des désordres physiologiques et à la pourriture. Des meurtrissures et des blessures peuvent se produire à cause de la pression des doigts au moment de la cueillette du fruit ou à cause de l'impact quand le fruit est lâché dans le panier et aussi pendant le transport et la manutention dans le bâtiment d'emballage. Des blessures sont aussi infligées en le coupant et par les glochides. La sensibilité du fruit aux blessures physiques augmente avec la maturité. Une forte pression cellulaire peut aussi causer des fêlures et micro-fêlures sur la peau, spécialement sur les fruits de seconde récolte, qui mûrissent dans des conditions environnementales plus humides.

Manipulation post-récolte

La présence d'épines et de glochides est l'une des principales contraintes limitant la consommation de figues de Barbarie et leur qualité marchande ; partout dans le monde ; leur élimination est la première opération post-récolte avant la commercialisation. Dans beaucoup de pays, spécialement avec des fruits destinés aux marchés locaux et consommés dans les quelques jours suivant la récolte, la suppression des épines est faite manuellement : les fruits sont étalés sur l'herbe ou sur une zone couverte de paille puis les fruits sont brossés avec un balai (Cantwell, 1995). Cependant, pour les fruits destinés à des marchés distants, la suppression des épines est faite sur les lignes d'emballage.

Contrairement à d'autres types de fruits, les opérations post-récoltes de la figue de Barbarie sont plutôt simples et limitées à la suppression des épines, le triage et l'emballage. Quelle que soit l'échelle du bâtiment d'emballage, la suppression des épines est généralement faite par un brossage à sec. Etant donné les traitements post-récoltes sont limités, les productions de



plusieurs producteurs associés peuvent être gérées à petite-échelle dans un bâtiment d'emballage sur l'exploitation équipé d'une **petite et simple ligne d'emballage** comprenant les éléments suivants :

- Un outil de déchargement - les fruits sont déchargés à sec avant de passer sur une série de rouleaux ;
- Un tunnel - une série de brosses, chacune tournant en sens inverse de la suivante, enlève les glochides qui sont soit aspirés hors de l'unité et déposés dans un sac jetable, soit laissés tomber en dessous des rouleaux ;
- Un second jeu de rouleaux - les fruits sont convoyés vers une grande table ronde où les ouvriers les trient, les classent et les emballent.

Les plus grandes unités d'emballage comprennent les éléments suivants :

- Une zone de déchargement ;
- Un tapis roulant les ouvriers présélectionnent les fruits ;
- La section de suppression des épines - conçue avec les mêmes critères que la chaîne d'emballage à petite échelle ;
- Un outil de tri - mécanique ou électronique ;
- Un outil de distribution et d'emballage pour un dernier tri et l'emballage.



Les fruits sont généralement emballés le jour de la récolte et directement livrés aux marchés de destination dans des conditions réfrigérées. Ils peuvent être transportés seuls ou mélangés à d'autres denrées, par camion, bateau ou par avion. Quand les fruits sont conditionnés quelques jours après la récolte, ils peuvent être stockés dans les conditions ambiantes pour sécher ou dans des salles de stockage à 6-10°C. Dans un petit nombre de pays (par exemple en Afrique du Sud), les fruits sont cirés pour remplacer les cires naturelles perdues pendant la suppression des épines, de manière à réduire la transpiration et à améliorer l'éclat de la peau. Aucun fongicide de synthèse n'est homologué pour des utilisations post-récoltes ; par conséquent, on doit prendre beaucoup de soins pour éviter les blessures et éviter le pourrissement microbologique.

En Italie, la **classification des fruits** est basée sur :

- Le cultivar ('Giulla' ou 'Surfarina' ; 'Red' ou 'Sanguigna' ; et 'Bianca' ou 'Muscaredda' ou 'Sciannarina') ;
- La catégorie (EXTRA et I) ;
- Le poids (classe B : 105-140 g ; classe C : 140-190 g ; classe D : 190-270 g).

En fonction du cultivar, les nuances de couleur de la peau peuvent varier de vert au jaune-orange pour le cultivar jaune ('Giulla'), de vert au rouge-rubis pour le cultivar rouge ('Rossa') et de vert au blanc-paille pour le cultivar blanc ('Bianca'). En fonction de la zone de production, les fruits destinés au marché de frais doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- Poids ≥ 120 g
- SST $\geq 13-14\%$ °Brix
- Fermeté de la chair ≥ 6 kg cm²

Les fruits les plus gros peuvent être emballés dans un plateau en carton ou en plastique dans lequel est insérée une couche d'un support à fruits en plastique. Les petits fruits, généralement destinés aux marchés locaux, sont emballés dans des plateaux en plastique ou dans des barquettes contenant 6-8 fruits.

Physiologie post-récolte

Les figuiers de Barbarie sont classés comme non-climactériques, puisqu'ils ne montrent pas d'augmentation de l'activité respiratoire pendant la période de maturation. Le taux de respiration est généralement considéré plutôt faible par rapport à d'autres fruits (Lakshminarayana et Estrella, 1978 ; Cantwell, 1995). Cependant, l'intensité respiratoire est fortement affectée par :

- La base génétique (relativement large pour le figuier de Barbarie) ;
- Le stade de maturité à la récolte ;
- Le type de culture ;
- Les conditions environnementales.

Dans une étude de différentes variétés de germoplasmes mexicains menée par López Castañeda *et al.*, (2010), l'activité respiratoire varie de 22 pour 'Rojo Pelón' à 31 ml CO₂ kg⁻¹ heure⁻¹ pour 'Sangre de Toro' et 'Alfajayucan'. Dans des études menées en Italie sur des fruits de la première récolte de 'Giulla', l'intensité respiratoire a montré une très importante variabilité d'année en année, allant de 4-14 mg CO₂ kg⁻¹ heure⁻¹ (Chessa et Schirra, 1992) à 13 ml CO₂ kg⁻¹ heure⁻¹ (D'Aquino *et al.*, 2014) et 60-92 mg CO₂ kg⁻¹ heure⁻¹ (Piga *et al.*, 1996). Comme pour d'autres espèces non-climactériques, la respiration décline graduellement quand les fruits sont gardés à des températures chaudes (D'Aquino *et al.*, 2014), mais quand ils passent de la température froide du stockage à la température ambiante, la respiration augmente grandement (Schirra *et al.*, 1999b) en réponse aux faibles températures. Des débuts d'infections par les microorganismes et des stress physiques ou mécaniques causés par des meurtrissures, des impacts ou des blessures peuvent aussi mener à une augmentation soudaine de l'activité respiratoire. La production d'éthylène est très faible, généralement 0.1-0.2 µl C₂H₄ kg⁻¹ heure⁻¹ et, comme pour la respiration, des augmentations significatives peuvent avoir lieu après une exposition prolongée à des températures froides, ou à cause d'une infection par un pathogène ou un stress abiotique (D'Aquino *et al.*, 2014 ; Schirra *et al.*, 1996, 1997).

Comme pour la plupart des fruits non-climactériques, la figue de Barbarie ne contient pas d'amidon. Donc

après la récolte, les SST, les sucres et les acides organiques tendent à décroître, en fonction des conditions de stockage, du stade de maturation et du cultivar ; le comportement du déclin peut être graduel ou irrégulier. Par exemple, dans une étude comparative avec 6 cultivars de figues de Barbarie entreposées à 9°C pendant 1, 2 ou 3 mois puis 4 jours à température ambiante, la perte des SST était très élevée pour 'Amarillo Montesa', 'Copena T-5' et 'Copena-Torreoja', mais graduelle pour 'Cristalina' et 'Pinochulo', alors que pour 'Burrona' les pertes étaient plus importantes pendant le premier mois de stockage (Corrales García *et al.*, 1997).

La teneur en vitamine C à la récolte varie d'environ 10 à 80 mg 100 g⁻¹ en fonction du cultivar (Butera *et al.*, 2002 ; Kuti, 2004). Elle peut varier grandement d'année en année (Sumaya Martínez *et al.*, 2011), mais dépend aussi du stade de maturation. Dans les fruits de cultivars jaunes et oranges d'*Opuntia megacantha* récoltés à des intervalles de 2 semaines, 4 semaines avant la maturité commerciale et puis 4 semaines après la maturité commerciale, la teneur en vitamine C a augmenté constamment même quand les fruits étaient à sur-maturité (Coria Cayupàn *et al.*, 2011). Pour les fruits stockés à des températures basses, la teneur en vitamine C est assez stable malgré le pH relativement élevé du jus (Schirra *et al.*, 1996) ; mais elle décline rapidement à température ambiante (D'Aquino *et al.*, 2014) ou après que les fruits soient transférés du stockage à froid vers des températures chaudes (Schirra *et al.*, 1996).

Désordres physiologiques

De la même manière que pour la plupart des espèces d'origine tropicale, la figue de Barbarie est susceptible de subir des blessures du froid quand elle est exposée pendant des périodes prolongées à des températures en dessous de 10-12°C. En effet, la **sensibilité intrinsèque du fruit à des températures basses** est nettement affectée par :

- Les conditions environnementales ;
- Les pratiques agronomiques ;
- Le type de récolte (d'été ou récolte tardive) ; le stade de maturité à la récolte ;
- Les traitements post-récoltes.

Généralement les fruits à un stade avancé de maturité sont moins susceptibles aux dégâts du froid que les fruits moins murs, alors que les traitements pré-récoltes à l'acide gibbérellique (Schirra *et al.*, 1999a) ou au chlorure de calcium (Schirra *et al.*, 1999b) n'affectent pas ou augmentent la sensibilité du fruit aux blessures du froid. Les symptômes de blessure du froid peuvent se manifester sur la peau sous forme de zones ébouillantées ou brunies de taille et d'intensité variables, de marques brunâtres-noires ou de tâches affaissées brunes (D'Aquino *et al.*, 2012). Cependant, en plus des symptômes visibles, les blessures du froid peuvent aussi causer des alté-

rations métaboliques ; de la même manière, l'apparence et la sévérité des désordres de la peau sont accompagnés par des altérations qualitatives non visibles. En effet, les altérations de la peau sont habituellement une combinaison de désordres induits par la faible température et d'autres causes (blessures superficielles infligées par les glochides, transpiration excessive, pourriture sèche) qui peuvent apparaître à des températures n'engendrant pas de blessures du froid (D'Aquino *et al.*, 2012, 2014). Des déséquilibres métaboliques peuvent altérer le métabolisme respiratoire, induire la production de composés volatils indésirables (acétaldéhydes, éthanol) et d'éthylène et affaiblir les mécanismes de défense globale de l'hôte face aux pathogènes (Schirra *et al.*, 1999a ; D'Aquino *et al.*, 2014). En conséquence, les fruits blessés par le froid peuvent montrer des désordres de la peau sans aucun changement de la qualité pour la consommation ou de la composition chimique (D'Aquino *et al.*, 2014) ; ou bien ils peuvent montrer des symptômes négligeables de blessure du froid à la fin du stockage au froid mais devenir très sensibles à la pourriture quand ils sont placés à des températures chaudes (Schirra *et al.* 1996, 1997, 1999b; D'Aquino *et al.*, 2014).

Pourriture post-récolte

La composition du fruit et la consistance des tissus rendent la figue de Barbarie très sensible à la pourriture déclenchée par divers champignons, bactéries ou levures pathogènes. L'extrémité de la tige est le site principal d'infection dû à la blessure causée par les opérations de récolte. Cependant, un séchage de 1 à 2 jours à température ambiante dans des conditions ventilées aide à cicatrifier les tissus blessés. Même une faible déshydratation de la petite partie de cladode laissée à la récolte peut réduire efficacement les risques de pourriture (Cantwell, 1995 ; Inglese *et al.*, 2002a). Les autres sites d'infection sont les micro-blessures causées par les glochides et les micro-fêlures dans la peau, spécialement si les fruits de seconde récolte sont récoltés dans des conditions humides. Les principaux champignons filamenteux qui engendrent la pourriture sont *Botrytis cinerea*, *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp. et diverses espèces de *Penicillium* incluant *P. digitatum*, *P. italicum*, *P. expansum* et *P. polonicum* (Chessa et Barbera, 1984 ; Rodriguez Felix *et al.*, 1992 ; Granata et Sidoti, 2000 ; Swart *et al.*, 2003 ; D'Aquino *et al.*, 2015 ; Faedda *et al.*, 2015a). Cependant, puisque les fruits ne sont généralement pas stockés pour de longues périodes, le risque de pourriture ne représente pas un problème sérieux.

Les traitements post-récoltes

Malgré les traitements limités au niveau commercial et la réfrigération occasionnelle durant de courtes périodes, l'augmentation au niveau mondial de la demande en figues de Barbarie - spécialement celle des marchés situés loin des zones de production - va engendrer, dans le futur, de nouveaux défis pour l'industrie de la figue de Barba-



rie. De manière à étendre la fenêtre de mise en marché au-delà de la saison de récolte et retarder le déclin de l'aspect du fruit, des **traitements post-récoltes et procédés de manipulation** appropriés sont nécessaires pour :

- Réduire les taux de transpiration et de respiration ;
- Augmenter la tolérance du fruit à des températures froides ;
- Eviter la détérioration microbiologique.

Bien que la réfrigération soit indubitablement le principal moyen pour prolonger la vie post-récolte des fruits frais et des légumes, la susceptibilité de la figue de Barbarie aux blessures du froid pose des limites à son utilisation. D'autre part, comme pour les autres denrées, avec l'augmentation de la durée de vie en stockage, les mécanismes naturels de défense contre les pathogènes déclinent et le fruit devient progressivement plus sensible aux attaques microbiologiques, spécialement quand ils sont transférés du stockage au froid à un environnement chaud.

Les expérimentations menées avec des fongicides post-récoltes homologués pour les autres denrées ont révélé divers degrés d'efficacité pour réduire l'incidence de la pourriture sur les figues de Barbarie stockées au froid :

- Les traitements de bénomyl, captane ou vinchlozoline ont été inefficaces pour contrôler la pourriture post-récolte (Gorini *et al.*, 1993).
- Les traitements d'imazalil (IMZ) et de thiabendazole (TBZ) ont évité la pourriture naturelle induite par *Penicillium* spp., *Botrytis cinerea* et *Alternaria* spp. sur les fruits de première récolte de 'Gialla' pendant une période de stockage de 2 mois à 8°C, suivie d'une semaine en conditions simulées de mise en marché à 20°C ; les symptômes de blessures du froid étaient aussi réduits (D'Aquino *et al.*, 1996). L'orthophénylphénate de sodium, soit seul soit en combinaison avec du TBZ ou de l'IMZ, était phytotoxique, donnant lieu à une augmentation de la pourriture et une perte de poids (D'Aquino *et al.*, 1996). L'efficacité du TBZ était nettement augmentée quand il était appliqué à 52°C même à une concentration six fois plus faible que celle appliquée à 20°C (Schirra *et al.*, 2002).
- Le fludioxonil, un fongicide de synthèse inscrit au cours de la dernière décennie pour contrôler une large gamme de champignons causant de la pourriture sur différentes denrées, a très efficacement contrôlé la pourriture quand il était appliqué à 20 ou 50°C avant le stockage ; par contre, son efficacité était réduite quand il était appliqué à la fin du stockage au froid (D'Aquino *et al.*, 2015).
- L'eau chaude - soit en traitement par immersion à 50-55°C pendant 2-5 minutes (Schirra *et al.*, 1996, 2002 ; Rodriguez *et al.*, 2005 ; D'Aquino *et al.*, 2012) soit par brossage à l'eau à 60, 65 ou 70°C pendant 30, 20 ou 10 secondes respectivement (Dimitris *et al.*, 2005) - a inhibé la croissance des pathogènes naturellement pré-

sents sur la surface du fruit.

- Le séchage (à 38°C pendant 24, 48 et 72 heures dans un environnement saturé en vapeur) n'a pas seulement contrôlé la pourriture, mais a aussi amélioré la résistance aux températures froides (Schirra *et al.*, 1997). Pourtant, sécher le fruit à 38°C avec 75-80% d'humidité relative (HR) a accéléré le détachement de la partie du cladode laissée lors de la récolte. De plus, le processus de cicatrisation à l'extrémité de la tige avec un séchage à la même température mais avec 100% d'HR a diminué la pourriture initiée par les pathogènes qui se développent depuis la tige (D'Aquino *et al.*, 2014). Le conditionnement à température élevée a retardé le vieillissement du fruit et la perte de poids, probablement dû à la fonte et au réarrangement des couches de cire épicuticulaire avec comme conséquence le remplissage des micro-fêlures séparant les plaquettes de cire, la voie principale de transpiration du fruit (Schirra *et al.*, 1999a; López Castañeda *et al.*, 2010).

D'autres traitements qui peuvent retarder la perte de fraîcheur et augmenter la tolérance aux faibles températures sont : le stockage en atmosphère contrôlée (Testoni et Eccher Zerbini, 1990) ; le traitement par immersion dans l'acide salicylique (Al Qurashi et Awad, 2012) ; et l'emballage dans un film plastique (Piga *et al.*, 1996, 1997; Shumye *et al.*, 2014), bien que ce dernier puisse induire des conditions anaérobies et l'accumulation de composés volatils indésirables (Piga *et al.*, 1996) si la perméabilité du film aux gaz ne correspond pas aux besoins en O₂ du fruit emballé.

DES FIGUES DE BARBARIE PRÊTES À CONSOMMER

Au cours des deux dernières décennies, le marché du fruit prédécoupé a bénéficié d'une croissance constante due à la tendance du consommateur à manger des aliments sains et pratiques à tout moment et en tout lieu. Les fruits et légumes prêts à consommer sont attractifs parce que leur consommation ne requiert pas de travail et ne génère pas de déchets via l'épluchage et le retrait du trognon (Rojas Graü *et al.*, 2011). Cela est particulièrement pertinent dans le cas de la figue de Barbarie, où la présence de glochides rend le fruit difficile à peler, spécialement pour les personnes qui n'y sont pas habituées.

Les fruits et légumes prédécoupés sont des produits très périssables ; les blessures causées par les opérations de préparation stimulent la respiration et la vitesse de production d'éthylène, accélérant la perte des substrats respirables, de la fermeté et de la sénescence. Les tissus endommagés sont aussi sujets au brunissement oxydatif dû à l'enzyme polyphénoloxydase (PPO) (Beaulieu et Gorny, 2004). La demande croissante en figues de Barbarie prédécoupées



a eu un impact marqué sur les entreprises impliquées dans la transformation et la distribution : Plus d'attention est accordée aux exigences en matière d'hygiène et de nouvelles propositions d'emballage sont adoptées pour répondre aux contraintes logistiques et aux attentes des consommateurs (Timpanaro *et al.*, 2015a).

Les principaux facteurs affectant la qualité des figues de Barbarie prédécoupées sont la perte d'acidité, la baisse de fermeté, la perte de jus et, par-dessus tout, la détérioration microbienne. La détérioration est un risque considérable, spécialement quand il y a une contamination par des microorganismes pathogènes avec des effets potentiellement nuisibles pour la santé du consommateur (Yahia et Saenz, 2011). Quand les fruits sont stockés à la température optimale de 4-5°C, les SST sont plutôt stables et parfois augmentent ; d'autre part, l'acidité titrable et le pH du jus sont relativement stables mais peuvent décroître (Piga *et al.*, 2000). Des températures plus élevées réduisent la durée potentielle de stockage, alors que l'augmentation des besoins en O₂ due à l'augmentation de l'activité métabolique peut ne pas être compatible avec la perméabilité aux gaz de l'emballage, conduisant à une augmentation anormale de l'acidité titrable, de l'éthanol et une altération du goût du fait de la respiration anaérobie (Piga *et al.*, 2000).

Sa faible acidité et sa teneur en sucre élevée font de la figue de Barbarie - plus que n'importe quel autre fruit - un substrat idéal pour la prolifération microbienne. De manière à maintenir les populations de bactéries et de levures en dessous des limites légales de 10⁷ et 10⁸ UFC g⁻¹ établies dans la législation espagnole (BOE, 2001), il est essentiel d'utiliser des équipements de transformation appropriés et d'adopter un programme de désinfection efficace, avec un personnel entraîné à la transformation en conditions hygiéniques et au maintien des faibles températures de stockage. La stérilisation de surface de la peau du fruit avant l'épluchage est généralement acquise par immersion dans un bain d'hypochlorite de sodium ; cependant, de nouvelles alternatives plus sûres pour les ouvriers et les consommateurs, et aussi respectueuses de l'environnement et économiques, telles que l'eau électrolysée (Pannitteri *et al.*, 2015), gagnent en popularité.

A condition que les opérations de transformation maintiennent à un niveau faible la charge microbiologique initiale, la température est le principal facteur affectant la population microbienne. La gamme recommandée de température de stockage de 8-12°C pour éviter les blessures du froid du fruit entier n'est pas optimale pour la conservation de figues de Barbarie prêtes à être consommées ; en effet, les meilleurs résultats en termes de maintien de la qualité globale chimique, sensorielle et microbiologique sont à 4-5°C (Piga *et al.*, 2000 ; Corbo *et al.*, 2004 ; Del Nobile *et al.*, 2007 ; Cefola *et al.*, 2014). La perméabilité du film utilisé pour l'emballage et la composition du gaz dans l'emballage ont un impact mineur sur la composition chimique et les populations microbiennes quand les fruits

sont stockés à 4-5°C. Cependant, l'augmentation de la température et les niveaux réduits de O₂, couplés avec l'augmentation de la concentration de CO₂, peuvent mener à des conditions d'anaérobiose et induire, à leur tour, la production de composés volatils indésirables, compromettant la qualité sensorielle et altérant la population microbienne qualitativement et quantitativement (Piga *et al.*, 2000 ; Del Nobile *et al.*, 2009).

Les enrobages à base d'alginate de sodium, de gel d'agar et de protéines de poissons n'ont pas affecté les levures et les bactéries mésophiles mais ont stimulé la charge d'acide lactique et de bactéries psychrotrophes et coliformes (Del Nobile *et al.*, 2009). Quand l'acide acétique a été combiné avec le chitosan, une diminution globale de la population microbienne a été atteinte en comparaison avec les fruits témoins (Ochoa Velasco et Guerrero Beltrán, 2014). L'enrobage des figues de Barbarie prédécoupées n'est pas commun au niveau commercial et la littérature n'indique pas de bénéfice clair et constant de leur application (Del Nobile *et al.*, 2009 ; Ochoa Velasco et Guerrero Beltrán, 2014 ; Palma *et al.*, 2015).

La réponse au stockage peut aussi être affectée par le stade de maturité et le moment de maturation du fruit. La qualité globale de la récolte d'été décline plus rapidement que celle d'une récolte de *scozzolatura*, de plus les fruits récoltés au stade commercial maintiennent leur qualité plus longtemps que les fruits récoltés plus tardivement, à pleine maturité, spécialement dans le cas de fruits venant de récolte de *scozzolatura* (Allegra *et al.*, 2015). Les populations de bactéries mésophiles et de moisissures sont plus affectées - bien que de manières différentes - par le stade de maturité que par le moment de maturation, les fruits récoltés à un stade avancé de maturité montrent une plus forte charge microbienne que les fruits récoltés au stade commercial (Allegra *et al.*, 2015).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES FUTURES

Alors qu'il y a eu une amélioration générale dans les pratiques du verger au cours des deux dernières décennies, beaucoup reste à faire pour convaincre les producteurs que le figuier de Barbarie peut atteindre des rendements élevés et une bonne qualité s'il reçoit les soins et l'attention appropriés - comme n'importe quelle autre culture. On espère qu'en fournissant les dernières informations techniques et scientifiques sur la conduite et la gestion post-récolte de la culture, les niveaux de productivité et spécialement les standards de qualité du fruit vont s'améliorer dans le monde, permettant à la figue de barbarie de rivaliser sur un pied d'égalité avec les autres fruits les plus courants sur les marchés internationaux. De manière à attirer de nouveaux consommateurs vers la figue de Barbarie et créer une demande plus élevée, une qualité élevée constante des fruits doit être dispo-



nible sur le marché. Il est plus facile d'augmenter la productivité en fruits que d'en améliorer la qualité; une attention particulière devrait par

conséquent être donnée à toutes les pratiques horticoles affectant potentiellement la qualité du fruit, avant et après la récolte.

Figure 1

Élimination des glochides des figues de Barbarie par des brosses rotatives : en plus de retirer les glochides les brosses lustrent le fruit.



Figure 2

Table de tri utilisée pour trier, évaluer et emballer les fruits.



Figure 3

Dégât du froid en forme de tâche de brûlure.



Figure 4

Dégât du froid en forme de dépressions sous la peau autour de la cicatrice du réceptacle.



Figure 5

Symptômes de blessure du froid sous forme de trous.



Figure 6

Cicatrices brunâtres après un stockage au froid prolongé.





Figure 7
Fente sur le fruit se produisant sur les fruits stockés à des niveaux élevés d'humidité.



Figure 8
Pourriture molle sur une figue de Barbarie à l'extrémité de la tige.

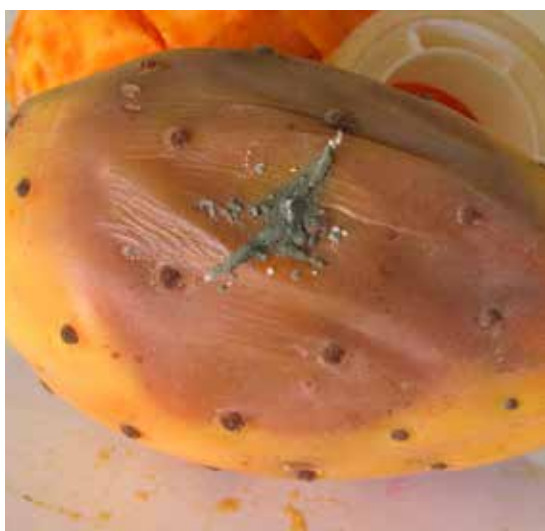


Figure 9
Pourriture causée par *Penicillium* spp. sur une figue de Barbarie stockée au froid



Figure 10
Pourriture sèche (*Alternaria* spp.) qui se développe lentement sur les figues de Barbarie stockées longtemps.



Figure 11
Opération d'épluchage pour préparer les figues de Barbarie prêtes à consommer.



Figure 12
Emballage des figues de Barbarie prêtes à consommer.



Production de fourrage et apports pour la nutrition animale

Jose C.B. Dubeux Jr.^a, Hichem Ben Salem^b et Ali Nefzaoui^c

^a Université de Floride, Centre de Recherche et d'Éducation de Floride du Nord, Marianna, États-Unis d'Amérique

^b Institut National de Recherche Agronomique de Tunisie, Université de Carthage, Ariana, Tunisie

^c Centre International pour la Recherche Agricole dans les Zones Arides, Tunis, Tunisie



Production de fourrage et apports pour la nutrition animale

INTRODUCTION

L'élevage reste la principale source de revenus pour les populations rurales vivant dans les zones arides. C'est un élément clé des systèmes de production résilients et un indicateur de richesse. Cependant, le secteur fait face à de nombreux défis incluant les contraintes d'alimentation et le changement climatique. Les parcours dans les régions semi-arides jouent un rôle important dans les systèmes de production animale, bien que leur contribution à l'alimentation du cheptel soit décroissante. La productivité des parcours est habituellement faible (< 5 tonnes de matière sèche [MS] ha⁻¹ an⁻¹) avec des rendements faibles de biomasse consommable (< 1 tonne de MS ha⁻¹ an⁻¹), engendrant de faibles

capacités de charge (12-15 ha pour nourrir une vache adulte) (Dubeux et al., 2015a). Les espèces pérennes adaptées sont une option potentielle pour améliorer la disponibilité en fourrage dans les zones sèches. La population globale de bétail a constamment augmenté au cours des dernières

décennies, menant souvent à une dégradation des pâturages. Le manque d'eau est un autre important facteur limitant dans les zones arides, menaçant la durabilité des systèmes basés sur l'élevage. Les projections globales indiquent que l'utilisation de l'eau va augmenter dans les décennies à venir ; il y aura donc moins d'eau disponible pour l'agriculture et l'élevage.

Dans ce scénario, le cactus devient une des plus importantes cultures pour le vingt-et-unième siècle. Le cactus, une espèce succulente et tolérante à la sécheresse, peut produire plus de 20 tonnes de MS ha⁻¹ an⁻¹ et fournir 180 tonnes ha⁻¹ an⁻¹ d'eau stockée dans ses cladodes, représentant une option rentable pour abreuver le bétail

(Dubeux et al., 2015b). A de tels niveaux de productivité, il est possible de produire suffisamment de fourrage pour alimenter cinq vaches adultes par an - au moins 60 fois plus que la productivité des pâturages. Avec de petits vergers de cactus intensément cultivés, il est possible de produire du fourrage et de réduire la pression des surpâturages.

Cependant, le potentiel du cactus reste sous-exploité. Les principales espèces de cactus utilisées comme fourrage incluent *Opuntia ficus-indica* Mill. et *Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck., avec plusieurs variétés disponibles dans différents pays.

On trouve des rapports sur l'utilisation réussie du cactus comme source d'aliments dans des pays tels que le Brésil, le Mexique, l'Afrique du Sud et la Tunisie, généralement soutenus par de forts programmes de vulgarisation et de recherche. Pour réussir, il est essentiel d'impliquer tous les acteurs de la filière de la production animale c'est-à-dire les producteurs, les fournisseurs, les distributeurs, les institutions de recherche et de conseil et les décideurs politiques. Le marché de l'aliment du bétail est en croissance et il entraîne moins de risques que les marchés de fruits et légumes, représentant donc une activité entrepreneuriale potentielle. Dans certains pays, les cladodes de cactus taillés dans les vergers fruitiers peuvent être utilisés comme aliment du bétail, complétant les revenus du fermier. En général, le potentiel fourrager du cactus dans les zones semi-arides est sous-utilisé. Il y a de formidables opportunités pour développer des systèmes de production animale basés sur le cactus, favorisant les moyens de subsistance des humains et réduisant la pression sur les pâturages naturels.

SYSTÈMES DE PRODUCTION DE FOURRAGE BASÉS SUR LES CACTUS

Faute d'information sur les surfaces de cactus dans les différentes zones agroécologiques, il n'est pas possible de faire une évaluation complète de l'importance du cactus au sein de divers systèmes de production. Par exemple, les données sur les cactus natifs ou le rôle du cactus dans les haies défensives et taillis sont importants mais rarement rapportés.



Figure 1
Cactus sauvages à San Luis Potosí, Mexique
(crédit photo : Ali Nefzaoui)

Origine

La plus grande zone de cactus indigène est située au Mexique et couvre une superficie estimée à 3 millions d'hectares. Le bétail va souvent pâturer dans ces zones et aucun traitement spécial n'est appliqué. Dans certains pays, les espèces de cactus peuvent devenir invasives et les plantations sont utilisées d'une manière similaire aux plantations indigènes - par exemple au Tigré en Ethiopie, le bétail pâture directement les cactus épineux.

Haies défensives et taillis

Très peu de choses sont connues sur cette forme de plantation de cactus, mais elle a clairement un rôle important dans beaucoup de pays, spécialement en Afrique du Nord et dans des parties de l'Espagne et de l'Italie, où de nombreuses fermes sont protégées par des clôtures biologiques utilisant des cactus épineux.

En plus de leur rôle défensif efficace, ces haies ont traditionnellement joué un rôle important dans l'organisation du paysage et l'économie sociale locale comme preuve des droits sur la terre et la possession de la terre dans des pays ou des régions où une possession collective de la terre est dominante, tels que l'Afrique du Nord. Les haies de cactus sont souvent plantées comme preuve de possession de la terre. De plus, elles contribuent au contrôle de l'érosion, particulièrement quand elles sont plantées le long des courbes de niveau (Le Houérou, 2002).

Les plantations de cactus prennent aussi la forme de bosquets autour des maisons rurales. Ce type de plantation « mitoyenne » est une source d'aliment pour le bétail familial et fournit des fruits pour l'autoconsommation et un abri pour la volaille familiale.

Production mixte de fruits et fourrage

C'est le système de plus commun et le plus répandu. Il est courant dans presque tous les pays où les conditions environnementales permettent au cactus de pousser et où la culture du cactus fait partie des connaissances et traditions locales. Il y a deux principaux types de plantation : les vergers à fruits intensifs et spécialisés, où l'objectif de production est de produire des fruits de bonne qualité pour les marchés locaux ou d'exportation ; et les vergers avec de faibles niveaux d'intrants, où les fruits sont principalement destinés à l'autoconsommation ou au marché local. Dans les deux cas, la taille fournit une grande quantité de cladodes qui sont vendus et/ou utilisés au niveau de la ferme pour nourrir le bétail.

Réhabilitation des pâturages

L'amélioration des pâturages en utilisant les cactus sans épines a été pratiquée principalement en Afrique du Nord depuis le début des années 1930-1940. Le Houérou (2002) rapporte que les plantations de fourrage étaient systématiquement développées, en particulier en Tunisie, sur la base de recherches conduites par Griffiths et ses collaborateurs au Texas, aux Etats-Unis d'Amérique. En 1932, le gouvernement de Tunisie a invité Griffiths et a appliqué ses 30 années d'expérience sur l'utilisation du cactus comme fourrage au centre de la Tunisie pour atténuer les effets de la sécheresse sur le bétail. De plus, l'attribution des terres a été autorisée en Tunisie centrale à la condition que les bénéficiaires contractants, entre autres, plantent 10% de la terre allouée avec des cactus sans épines pour agir comme stock-tampon en cas d'urgence et culture de réserve de fourrage sur pied. Cela s'est révélé être une sage décision, parce que le pays a fait face à trois ans de sécheresse sévère de 1946 à 1948, au cours de laquelle 70 à 75% du bétail a été décimé - mais pas dans les fermes avec des plantations de cactus (Le Houérou, 2002).

D'un point de vue agronomique, de manière à réhabiliter ou améliorer les pâturages, la brousse, le bush ou les zones agricoles pauvres caractérisées par un sol superficiel, caillouteux, escarpé ou sableux ou bien là où le climat est trop sec pour pratiquer l'agriculture, une stratégie appropriée de plantation doit être adoptée : une densité de 1 000 à 2 000 cladodes simples ou doubles par ha, avec un espacement de 5-7 m entre les lignes et 1-2 m sur les lignes. En général, aucun traitement spécial (par exemple : application d'engrais, taille et traitements contre les insectes) n'est appliqué. De l'irrigation complémentaire peut être appliquée pendant la mise en place - mais seulement si la première année est trop sèche. Les plantations sont exploitables 3-4 ans après et complètement développées après 7-10 ans ; si elles sont gérées rationnellement, elles peuvent rester productives pendant plus de 50 ans.

La productivité d'un pâturage planté avec des cactus peut être accrue par un facteur allant de 1 à 10 quand il est très dégradé et allant de 1 à 5 dans de bonnes conditions (Le Houérou, 2002) ; des résultats similaires sont rapportés par Nefzaoui et El Mourid (2009). Des résultats impressionnants sont obtenus avec des arbustes à croissance rapide (*Acacia cyanophylla* Lindl.) ou des cactus (*Opuntia ficus-indica*) en Tunisie centrale (**Tableau 1**).

Peu d'espèces de plantes sont capables d'accroître la productivité de la terre avec de tels taux, spé-

TABLEAU 1 Productivité de pâturages naturels et améliorés en Tunisie (Nefzaoui et El Mourid, 2009)

Type de pâturage	Productivité (unité de fourrage par hectare et par an) ^a
Pâturage naturel à Dhahar Tataouine, Tunisie (100 mm de précipitations)	35-100
Pâturages privés améliorés par la culture de cactus à Ouled Farhane, Tunisie (250 mm de précipitations)	800-1 000
Pâturage coopératif amélioré avec <i>Acacia cyanophylla</i> Lindl., Guettis, Tunisie (200 mm de précipitations)	400-500

^a Une unité de fourrage est équivalente à l'énergie métabolisable d'1 kg de grain d'orge (12.4 MJ kg⁻¹ MS)

cialement sur des terres marginales caractérisées par une faible efficacité d'utilisation de la pluie (RUE [de l'anglais « rain-use efficiency »], mesurée en kg MS ha⁻¹ an⁻¹ mm⁻¹), par exemple (Le Houérou, 1984) :

- Parcours Méditerranéens dégradés : RUE = 1-3
- Parcours en bonnes conditions : RUE = 4-6
- Parcours de désert : RUE = 0.1-0.5

Cependant, les cactus ont une RUE élevée. La réhabilitation des parcours avec *O. ficus-indica* présente une RUE de 10-20 kg de MS aérienne ha⁻¹ an⁻¹ mm⁻¹ dans les zones arides où les précipitations sont de 200-400 mm an⁻¹.

Culture en allées

L'expansion de la culture de céréales dans les pâturages et la réduction de la pratique de la jachère font partie des principales causes du déclin de la fertilité des sols et de l'érosion éolienne. Une des manières de combattre la dégradation engendrée par la monoculture de céréales est l'introduction, dans les systèmes de culture, de légumineuses fourragères adaptées, arbustes/arbres fourragers et de cactus (Nefzaoui *et al.*, 2011).

La culture en allées est une pratique agroforestière où les cultures pérennes sont simultanément cultivées avec une culture annuelle (orge, avoine, etc.). Les arbustes, les arbres ou les cactus sont cultivés en rangs larges (e.g. 10-15 m) avec une culture dans l'inter-rang. La culture en allées est une variation de la culture associée en haies. Les espèces d'arbres et d'arbustes légumineux poussant rapidement sont préférées (Saraiva, 2014). Les arbres légumineux améliorent les caractéristiques du sol (par exemple le recyclage des éléments nutritifs, la fixation biologique de N₂), empêchent la croissance des adventices et contrôlent l'érosion du sol sur les terres en pente. La culture en allées permet aux fermiers de continuer à cultiver la terre en même temps que les arbres ou les arbustes plantés dans des rangées intermittentes aident à maintenir la qualité du sol. Les cactus peuvent agir en brise-vent, permettant de meilleurs rendements d'herbe et de céréales. La culture en allées larges permet aux animaux de pâturer la strate de biomasse ou les chaumes

de céréales en été et les cladodes de cactus peuvent être récoltés, hachés et directement donnés aux animaux comme supplément d'énergie aux chaumes de faible qualité (Nefzaoui *et al.*, 2011).

Si elle est correctement gérée, la culture en allées peut fournir des revenus, à différents intervalles de temps pour différents marchés, d'une manière durable et être orientée sur la conservation. La conception des allées peut aussi permettre un meilleur usage de l'espace disponible entre les arbres et ajouter des protections et de la diversité aux champs agricoles.

Les vergers de cactus en monoculture sont peu adoptés pour diverses raisons allant de la conception technique des plantations à la mauvaise gestion de la compétition pour la terre souvent dédiée aux cultures céréalières. Cependant, la culture en allées surpasse ces contraintes parce qu'elle :

- Améliore la fertilité du sol ;
- Augmente le rendement de la culture ;
- Réduit les adventices ;
- Améliore les performances des animaux

La culture en allées correctement gérée permet la diversification et les fermiers peuvent bénéficier de plusieurs marchés. Elle favorise aussi la durabilité des productions végétales et animales en accroissant la productivité de la terre et réduit les risques météorologiques par rapport à la culture de plantes annuelles seules. Les bénéfices de la culture en allées de cactus et d'orge ont été évalués en Tunisie (Alary *et al.*, 2007 ; Shideed *et al.*, 2007). En comparaison avec l'orge seule, la biomasse totale (paille et grain) de l'orge cultivée entre les rangs de cactus sans épine a augmenté de 4.24 à 6.65 tonnes ha⁻¹ et le grain de 0.82 à 2.32 tonnes ha⁻¹. Ces résultats reflètent l'impact des cactus en culture en allées sur le micro-environnement, en particulier l'effet « brise-vent » bénéfique qui réduit les pertes d'eau et augmente l'humidité du sol. La culture d'orge a stimulé l'augmentation du nombre de cladodes et de fruits, alors que le cactus a augmenté la quantité de matériel racinaire contribuant à la matière organique du sol.



Les légumineuses arborescentes sont une autre option pour la culture en allées avec les cactus. Les légumineuses arborescentes apportent de l'azote au système, fournissant des protéines et des fibres à l'alimentation du bétail à base de cactus. Au Brésil, *Gliricidia sepium* ou *Leucaena leucocephala* ont été utilisés avec des cactus et une comparaison

a été faite avec des cactus plantés en monoculture. L'ajout de légumineuses n'a pas changé la biomasse totale mais elle a fourni une source de nourriture diversifiée (**Tableau 3**). Les cactus et les légumineuses peuvent être cultivés localement dans les zones semi-arides, réduisant la dépendance aux grains étrangers et augmentant la sécurité alimentaire.

TABLEAU 2 Changements de biomasse totale et rendements de l'orge à Sidi Bouzid (Tunisie)^a

Traitement	Pâturage naturel	Orge (seule)	Cactus (seul)	Culture en allées (cactus + orge)
Biomasse aérienne (tonnes ha ⁻¹)	0.51	0.53	1.87	7.11
Biomasse racinaire (tonnes ha ⁻¹)	0.33	0.11	1.8	1.98
Rendement en grain de l'orge (tonnes ha ⁻¹)		0.82		2.32
Grain d'orge + paille + adventices (tonnes ha ⁻¹)		4.24		6.65

^a Les précipitations moyennes à Sidi Bouzid sont de 250 mm an⁻¹. Aucun engrais n'a été appliqué aux traitements. Source : Alary et al. (2007).

TABLEAU 3 Productivité en biomasse en culture en allées avec des cactus de *Gliricidia sepium* ou *Leucaena leucocephala*, Pernambuco, Brésil

Système de culture	Biomasse du cactus	Biomasse de la légumineuse	Biomasse totale
	tonnes MS ha ⁻¹ an ⁻¹		
Cactus + <i>Gliricidia</i>	13.6 ^a	4.2 ^a	17.8 ^a
Cactus + <i>Leucaena</i>	14.0 ^a	2.6 ^b	16.6 ^a
Cactus	16.9 ^a	–	16.9 ^a
Erreur standard	1.0	0.2	0.8

^{a,b} Les moyennes dans la même colonne suivies par des petites lettres similaires ne diffèrent pas au test de Tukey à 5%. Source : Saraiva (2014).



Figure 2
Exemples de techniques de culture en allées utilisant *O. ficus-indica* et le maïs (Crédit photo : Jaime Mena)

Figure 3

Culture en allées de cactus et *Gliricidia sepium*, Etat de Pernambuco, Brésil (légumineuses arborescentes plantées en rangs, cactus plantés entre les rangs)
(Crédit photo : Jose Dubeux)

**Figure 4**

Plantation de cactus pour la production de fourrage (haut) ; détails de l'installation d'irrigation et de fertigation (bas), Zacatecas, Mexique



Système intensif (avec ou sans irrigation, à haute densité)

Le système intensif pour la production de cactus fourrager est limité à un faible nombre de pays. Il est fréquent principalement dans le nord-est du Brésil et dans quelques zones au Mexique. La **Figure 4** illustre un exemple extrême d'intensification au Mexique, où les cactus sont cultivés avec de l'irrigation par goutteurs et de la fertigation sur les exploitations laitières (Figure 4). Des expériences récentes au Brésil indiquent que l'irrigation par goutteurs de 10 mm mois⁻¹ (2.5 mm semaine⁻¹) en utilisant de l'eau récoltée à travers le captage d'eau *in situ*, augmente la productivité et permet la culture de cactus dans des zones où sa croissance était auparavant limitée à cause des températures nocturnes élevées et de manque d'humidité du sol (Lima *et al.*, 2015).

PRATIQUES AGRONOMIQUES

Adaptation écologique

Les *Opuntias* sont endémiques dans une diversité d'environnements : du niveau de la mer dans le désert Californien à 4 700 m au-dessus du niveau de la mer dans les Andes Péruviennes ; des zones tropicales du Mexique, avec des températures toujours supérieures à 5°C, à des zones du Canada où les températures descendent aussi bas que -40°C (Nobel, 1995). Alors que le figuier de Barbarie requiert une fertilité de sol élevée de manière à atteindre son potentiel de production, il croît aussi dans les sols pauvres. Cependant, il a besoin de sols bien drainés et ne tolère pas les sols salins (Berry et Nobel, 1985).

Les *Opuntias* ont un métabolisme acide crassulacéen (CAM) pour la fixation du carbone : quand il est exposé à un stress hydrique, le cactus ouvre ses stomates seulement la nuit pour réduire les pertes d'eau. Par conséquent, des nuits plus fraîches (15-20°C) sont bénéfiques pour le développement du cactus par rapport à des nuits plus chaudes (> 25-30°C). Des températures plus chaudes accroissent la capacité de l'air à retenir de la vapeur d'eau, réduisant donc l'humidité relative. Réciproquement, des températures plus fraîches augmentent l'humidité relative de l'atmosphère et réduisent les pertes d'eau du cactus. Nobel (1995) a rapporté une réduction de la capacité de rétention d'eau de l'atmosphère de 39.7 g m⁻³ à 35°C à seulement 6.8 g m⁻³ à 5°C. Puisque les températures nocturnes sont aussi liées à l'altitude, le cactus croît mieux dans les régions montagneuses, parce qu'il y a moins de pertes d'eau pendant les nuits plus fraîches. Rocha (1991) a indiqué que tous les 100 m d'altitude il y a une réduction de 0.65°C de la température moyenne.

Les *Opuntia* ou *Nopalea* ont le potentiel le plus élevé de production de fourrage en comparaison avec d'autres espèces de cactus. Les *Nopalea* requièrent souvent des précipitations plus importantes (> 600 mm an⁻¹) que les *Opuntias* (> 400 mm an⁻¹). L'interaction entre les précipitations et la température à une altitude donnée affecte la performance de croissance du cactus : à une altitude élevée avec des nuits fraîches, le cactus a besoin de moins de précipitations qu'un cactus installé sur un site avec des températures nocturnes chaudes.

Variétés et mise en place

Le cactus est multiplié végétativement. Les cladodes sont utilisés comme matériel de propagation et ils préservent les caractéristiques du matériel parental. A la mise en place d'un verger de cactus, divers facteurs devraient être considérés, à savoir : la variété du cactus, le type de cladode utilisé (c'est-à-dire primaire, secondaire ou tertiaire), le nombre et la position des cladodes, le moment de plantation, l'espacement entre les plantes, la méthode de plantation, le contrôle des adventives, la fertilisation et l'occurrence de ravageurs et maladies. Les pratiques de gestion interagissent habituellement et elles devraient être soigneusement analysées dans une approche systémique.

Des variétés indiquées pour la production de fourrage et adaptées aux conditions environnementales spécifiques devraient être utilisées et des essais de variétés doivent être mis en place dans différents lieux et régions pour sélectionner celles aux performances élevées. Il est important de prendre en compte la prévalence des ravageurs et des maladies dans certaines zones et de choisir la meilleure variété pour la région. Au Brésil, par exemple, les variétés communes incluent 'Gigante' et 'Redonda' (*Opuntia ficus-indica* Mill.), mais une épidémie de cochenille (*Dactylopius opuntiae* Cockerell) a mené à un changement dans les recommandations de variétés. Les producteurs de la région sont actuellement en train de planter des variétés tolérantes à cet insecte ('Orelha de elefante Mexicana' - *Opuntia* spp. ; 'Muida' - *Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck.). C'est un exemple d'une approche intégrée, prenant en considération les différentes limites environnementales au moment de choisir une variété adaptée.

Une fois que la meilleure variété est identifiée, le choix du site est la clé de la réussite. Les caractéristiques écologiques doivent être prises en compte et le site devrait avoir un sol bien drainé et une fertilité équilibrée (Dubeux et Santos, 2005).

La plantation se fait généralement dans le dernier tiers de la saison sèche de manière à réduire l'occurrence de pathogènes sur les plantes, qui sont plus communs pendant la saison des pluies (Inglese, 1995 ; Farias *et al.*, 2005). Les cladodes de cactus plantés pendant la saison sèche



sont capables de développer des racines initiales après la plantation, réduisant donc l'incidence de maladies pendant la saison humide. Quand le matériel végétal pour la plantation est récolté, il est recommandé de le laisser à l'ombre pour permettre à la portion coupée de guérir et réduire l'incidence des maladies. Mondragón Jacobo et Pimienta Barrios (1995) ont recommandé de placer les cladodes à l'ombre pendant 4-6 semaines avant de les planter pour guérir la coupure et réduire l'incidence des maladies. Au Brésil, il est commun de placer les cladodes à l'ombre pendant 5-7 jours pour atteindre des bons résultats (Farias *et al.*, 2005). Un fongicide (par exemple du Thiabendazol à 60% ou de la « bouillie Bordelaise ») peut être utilisé pour réduire les maladies fongiques (Mondragón Jacobo et Pimienta Barrios, 1995 ; Farias *et al.*, 2005). Des cladodes matures de la portion intermédiaire de la plante-mère devraient être utilisés pour la multiplication (Tapia, 1983).

Si la mécanisation est disponible, les cactus peuvent être plantés dans des sillons de 15-20 cm de profondeur. Cependant, il est commun d'utiliser une houe pour creuser des trous individuels, en particulier dans les petits systèmes agricoles. En général, un cladode par trou (ou position sur sillon) est recommandé ; planter plus de cladodes par position peut donner des rendements plus élevés mais les coûts de mise en place plus élevés ne justifient pas toujours l'utilisation de 2 ou 3 fois plus de matériel végétal (Mafra *et al.*, 1974). De même, un demi cladode peut être planté, mais la productivité est habituellement réduite, particulièrement à la première récolte (Medeiros *et al.*, 1997). En fonction du cultivar, la masse du cladode varie, allant de 0.5 à 1 kg pour la plupart des variétés d'*Opuntia*, bien que l'on rencontre souvent des cladodes plus lourds. Les cladodes des variétés de *Nopalea* sont habituellement plus légers (0.3-0.7 kg).

La position du cladode affecte la mise en place. Mafra *et al.*, (1974) ont testé trois positions : horizontale, verticale ou diagonale. Alors qu'aucune différence de production de biomasse n'a été révélée, des plantes se sont effondrées quand les cladodes étaient placés horizontalement à la plantation. Par conséquent, les auteurs recommandent de planter en position verticale ou diagonale, avec un tiers du cladode enterré. L'orientation - nord-sud (N-S) ou est-ouest (E-O) - des cladodes peut aussi être importante. Au Mexique, Rodrigues *et al.* (1975) ont observé que les cladodes exposés N-S produisaient moins que les cladodes exposés E-O, et ils ont attribué le résultat à une plus grande interception de la lumière avec l'orientation E-O des cladodes. D'autre part, au Brésil, les études n'indiquent pas de différences entre les positions N-S et E-O du cladode. Les jeunes cladodes prennent en réalité différentes directions, engendrant une architecture unique de la plante qui optimise l'interception de la lumière. Il est important de suivre les courbes de niveaux, en particu-

lier sur les pentes escarpées ; les cactus devraient faire face à la pente pour réduire l'érosion du sol.

L'espacement recommandé entre les plantes varie selon le système de production et l'environnement. Les cactus peuvent être plantés en monoculture ou en association avec des cultures de rente. Farias *et al.* (1989) ont testé différents espacements de plantes pour le cactus associé au sorgho (*Sorghum bicolor* L.). Les cladodes de cactus ont été espacés de 3 x 1 x 0.5 m ou de 7 x 1 x 0.5 m et le sorgho a été semé entre les rangs. Les cactus ont produit moins de biomasse dans l'espacement le plus large mais le sorgho a compensé cette perte. Si la mécanisation est disponible, cela devrait être pris en compte en choisissant l'espacement optimal, qui peut aussi varier avec le lieu. Dans les zones plus sèches, l'espacement devrait être plus grand pour que les plantes puissent individuellement développer une plus grande masse racinaire, réduisant les risques pendant les périodes de sécheresse (Dubeux *et al.*, 2011a, b).

Les sites avec une meilleure fertilité de sol et des précipitations plus importantes sont plus adaptés à recevoir des plantations à haute densité de cactus. Souza (2015) a observé une augmentation linéaire du rendement de matière sèche de *Nopalea cochenillifera* avec l'augmentation de la densité de la population : de 10 417 plantes ha⁻¹ à 1.2 x 0.8 m à 83 333 plantes ha⁻¹ à 1.2 x 0.1 m. Les réponses linéaires à l'espacement des plantes ont aussi été observées par Silva (2012) pour *O. ficus-indica* avec la population de plantes variant de 20 000 à 160 000 plantes ha⁻¹. De plus grandes réponses ont été observées avec une plus grande fertilisation organique (80 tonnes ha⁻¹ de fumier de bovin).

Fertilisation

Les cactus (*Opuntia* et *Nopalea*) ont un potentiel de productivité élevé mais il est atteint seulement avec une fertilisation appropriée (Silva, 2012). Les exportations d'éléments minéraux des champs de cactus dédiées à la production de fourrage sont élevées parce que les cladodes sont retirés du champ dans les opérations d'affouragement en vert. La concentration d'éléments minéraux dans les cladodes de cactus varie en fonction du cultivar, des conditions environnementales et de la conduite. En considérant une concentration moyenne (sur une base MS) de 0.9% de N, 0.16% de P, 2.58% de K et 2.35% de Ca (Santos *et al.*, 1990) et une productivité annuelle de 20 tonnes MS ha⁻¹, les éléments minéraux exportés (kg ha⁻¹ an⁻¹) via la végétation récoltée seraient de 180 kg de N, 32 kg de P, 516 kg de K et 470 kg de Ca, sans prendre en compte les autres macro - et microéléments (Dubeux et Santos, 2005). Par conséquent, cette demande en éléments minéraux doit être compensée par la fertilisation de manière à ce que le système soit durable dans le temps.



Les cactus répondent souvent mieux à la fertilisation organique qu'à la fertilisation minérale (Méndez Gallegos et Martínez Hernandez, 1988 ; Santos *et al.*, 1996). Il y a habituellement une interaction entre les niveaux de fertilisation, l'espacement entre les plantes et les conditions environnementales ; plus la population de plantes est grande plus il y a besoin d'apporter des fertilisants. Le cultivar 'IPA-20' (*Opuntia ficus-indica* Mill.) a présenté une réponse linéaire jusqu'à 80 tonnes ha⁻¹ de fumier de bovin appliqué, avec une population de 20 000 à 160 000 plantes ha⁻¹. De plus grandes réponses ont été observées avec la combinaison de plus fortes fertilisations organiques et de populations de plantes plus denses. De tels systèmes intensifs peuvent atteindre une productivité annuelle de plus de 50 tonnes MS ha⁻¹ (Silva, 2012). Cependant, les producteurs au nord-est du Brésil appliquent habituellement 20-30 tonnes ha⁻¹ de fumier. En effet, les petits producteurs peuvent ne pas avoir accès à de grandes quantités de fumier et la disponibilité en temps et en main d'œuvre pourrait aussi être réduite.

Le fumier devrait être incorporé dans le sol (Inglese, 1995 ; Mondragón Jacobo et Pimienta Barrios, 1995) ou appliqué en surface à la plantation et après chaque récolte. Saraiva (2014) a évalué différentes sources de fertilisants organiques (fumiers de bovin, d'ovin et de caprin ainsi que la litière de poulet) sur le développement de cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck). Les amendements organiques ont été appliqués à la même dose (200 kg N ha⁻¹) - aussi, étant donné que la concentration d'azote diffère entre les sources, la quantité totale a en réalité varié - et les auteurs n'ont observé aucune différence dans la productivité de cactus. Berry et Nobel (1985) ont évalué les stress minéraux de deux espèces de cactus (*O. ficus-indica* et *Ferocactus acanthodes*) et ont observé que ces espèces n'avaient pas besoin d'un niveau élevé de Ca dans la solution du sol. En fait, leur développement n'a pas été affecté quand le pH du sol était de 4.5 à 8.5. Les niveaux élevés de Ca observés dans les cladodes reflètent la teneur élevée en oxalate de calcium. Le potassium est l'élément minéral extrait en plus grande quantité dû à sa concentration élevée dans les cladodes du cactus. Par conséquent, il est essentiel de réapprovisionner le K du sol après chaque récolte pour maintenir la productivité des cactus.

Une combinaison de fertilisants organiques et minéraux pourrait être la meilleure option quand il y a moins de fumier disponible. Dubeux et Santos (2005) ont estimé que la carence en éléments minéraux se produisait dans les vergers de cactus avec une population de densité élevée (40 000 plantes ha⁻¹) et une productivité élevée (20 tonnes MS ha⁻¹ an⁻¹) quand seulement 20 tonnes ha⁻¹ de fumier de bovin étaient apportées. Nobel *et al.* (1987) ont observé une augmentation de la productivité (*Opuntia engelmannii* Salm-Dyck) avec 160 kg N ha⁻¹

et 80 kg P ha⁻¹. Les auteurs ont aussi noté que le bore augmentait significativement le rendement des cactus. Nobel (1995) a indiqué que N, P, K, B et Na étaient les éléments minéraux qui influencent le plus la productivité des cactus. Baca Castillo (1988) a classé P, N, K, Ca, B, Mg, Fe et Mn en ordre d'importance décroissant, les considérant comme les éléments minéraux ayant le plus grand effet sur la croissance des cactus. En fait, Dubeux *et al.* (2006) ont observé une augmentation linéaire de la productivité d'*Opuntia ficus-indica* Mill. jusqu'à 300 kg N ha⁻¹ an⁻¹ sur différents sites dans la région semi-aride du Brésil. Ils ont observé que la fertilisation azotée augmentait la concentration de N dans les cladodes des cactus et améliorait l'efficacité d'utilisation de l'eau de pluie. La fertilisation phosphatée a induit une réponse positive sur le rendement seulement quand le P du sol était inférieur à 10 mg kg⁻¹.

Les sols salins ne sont pas adaptés à la culture des cactus (*Opuntia* et *Nopalea*), puisqu'ils réduisent la croissance des racines et des tiges (Nerd *et al.*, 1991c ; Calderón Paniagua *et al.*, 1997). Berry et Nobel (1985) ont montré que les racines d'*O. ficus-indica* Mill. ont exprimé un stress salin quand la concentration de NaCl dans la solution d'éléments minéraux atteint 25 mM, réduisant le développement des tiges.

Gestion des adventices

Le contrôle des adventices est essentiel pour augmenter la productivité du cactus. Le cactus a des racines superficielles qui se développent horizontalement. Dans des conditions favorables, les racines peuvent croître à une profondeur de 30 cm et s'étendre dans un rayon de 4 à 8 m (Sudzuki Hills, 1995). Par conséquent, les adventices concurrencent les cactus pour les éléments minéraux, l'humidité et la lumière. Farias *et al.* (2005) ont testé différentes méthodes de contrôle des adventices sur le développement du cactus *Opuntia ficus-indica* Mill. cv. 'IPA-20'. Quand les adventices ne sont pas contrôlées, les cactus ne produisent que 3 tonnes MS ha⁻¹ après deux ans de croissance par rapport aux 12 tonnes MS ha⁻¹ obtenues en utilisant le meilleur traitement (Tebuthiuron appliqué comme herbicide de pré-émergence à 2 litres ha⁻¹). Donc, le contrôle des adventices a engendré une multiplication par 4 du rendement des cactus. Le contrôle mécanique n'était pas aussi efficace que les herbicides de pré-émergence : Diuron, Tebuthiuron, ou une combinaison de Simazine et Ametryne. Si les adventices sont une matière potentielle pour du fourrage de qualité il est possible d'éviter l'application d'herbicides et produire à la place du foin à utiliser quand on alimente le bétail avec du cactus. Cependant, cette approche engendre une réduction de la productivité des cactus (Farias *et al.*, 2005). Felker et Russel (1988) ont indiqué que le glyphosate pouvait être utilisé à 20 g litre⁻¹ pour *O. lindheimeri* sans causer de dommages. Ils indiquent

Figure 5
Récolte, transport et utilisation des cactus dans l'Etat de Pernambuco, Brésil
(Crédit photos : Jose Dubeux)



aussi que l'Hexazinone, le Simazine et le Tebuthiuron favorisent les meilleurs rendements pour cette espèce. L'espacement des plantes est important pour mécaniser le contrôle des adventices. Au Brésil, les espacements des plantes récemment utilisés pour la production de cactus fourrager sont 1.6 x 0.2 m pour *Opuntia* et 1.2 x 0.2 pour *Nopalea* (Silva, 2012; Souza, 2015).

Gestion de la récolte

La gestion de la récolte des cactus doit prendre en considération l'intensité, la fréquence et le moment de la récolte. L'interaction entre ces facteurs affecte la repousse des cactus. Plusieurs essais de récolte ont été menés au nord-est du Brésil pour déterminer la meilleure stratégie de récolte pour maximiser la croissance (Lima *et al.*, 1974 ; Santos *et al.*, 1996, 1998 ; Farias *et al.*, 2000). En général, une augmentation de la fréquence de récolte requiert une diminution de son intensité et ces deux facteurs interagissent avec la population de plantes. La zone photosynthétique résiduelle après la récolte est critique pour augmenter la repousse de la plante et il en est de même pour les cactus. Des essais au champ ont souvent révélé un faible indice de surface de cladode (CAI de l'anglais « cladode area index »), qui réduit l'interception de la lumière et la croissance de la plante. Nobel (1995) suggère qu'un CAI entre 4 et 5 augmente la productivité des cactus. Les deux faces des cladodes sont prises en compte quand on mesure le CAI. Plus la population de plantes est grande, plus le CAI est élevé, engendrant une

productivité accrue quand il n'y a pas d'autres facteurs limitant la croissance. Farias *et al.* (2000) ont observé que quand les cactus (*O. ficus-indica* Mill.) étaient récoltés tous les 4 ans, il n'y avait pas de différences entre la préservation des cladodes primaires et secondaires. D'autre part, récolter tous les 2 ans requiert une coupe moins intense avec la préservation de tous les cladodes secondaires. Cependant, cet essai a été réalisé sur des populations de cactus de moins de 10 000 plantes ha⁻¹ ; avec une population de plantes plus dense, une récolte plus fréquente pourrait être possible grâce au plus grand CAI résiduel après la coupe. Souza (2015) a observé que la productivité augmentait avec une population de plantes plus dense ($\leq 83\ 333$ plantes ha⁻¹), en récoltant une année sur deux et en préservant les cladodes primaires. Cependant, ce système intensif requiert plus d'intrants en fertilisation organique.

Les cactus sont habituellement récoltés à la saison sèche, quand l'aliment du bétail se fait rare. Dans des systèmes de production plus intensifs, le cactus est considéré comme un composant important de l'alimentation du bétail tout au long de l'année, mais l'approvisionnement en cactus toute l'année n'est pas commun dans la plupart des régions. En saison des pluies, les producteurs profitent habituellement des prairies et des pâturages, laissant les cactus pour la saison sèche. Pendant la saison des pluies, la teneur en eau des cladodes augmente ce qui offre plus de chance aux incidences pathogènes sur la surface de coupe des cladodes, engendrant plus de problèmes de maladies.

Irrigation

L'irrigation n'est pas une pratique commune dans les vergers de cactus consacrés à la production de fourrage. Dans certaines régions où les faibles précipitations associées à des températures de nuits chaudes limitent le développement des cactus, l'apport de petites quantités d'eau a étendu la zone de plantation de cactus. Dubeux *et al.* (2015b) rapportent que l'utilisation de l'irrigation avec des goutteurs (seulement 100 mm mois⁻¹) engendrait un rendement annuel de matière sèche inférieur ou égal à 19.6 tonnes ha⁻¹ dans une région où les cactus (*O. ficus-indica* Mill.) ne pousseraient pas bien autrement à cause des faibles précipitations et des températures nocturnes chaudes.

La concentration de sel dans l'eau d'irrigation est un problème. L'application de petites quantités d'eau et l'utilisation d'engrais organiques réduisent tout problème potentiel de salinisation. Snyman (2004) a observé qu'une irrigation de seulement 13.6 et 11.6 mm pour *O. ficus-indica* et *O. robusta*, respectivement, était suffisante pour remplir les cladodes des plantes sujettes à un déficit hydrique. Dans les systèmes pluviaux, l'efficacité d'utilisation des précipitations (RUE) varie selon l'environnement et les pratiques de gestion. Dubeux *et al.* (2006) rapportent une RUE moyenne de 18 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹, avec des valeurs allant de 5 à 35 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹.

Productivité

Les cactus peuvent atteindre une productivité élevée dans les agro-écosystèmes semi-arides pluviaux. Un système pluvial dans le nord-est du Brésil a atteint une productivité de plus de 50 tonnes MS ha⁻¹ an⁻¹ dans un système de culture intensif incluant l'utilisation de niveaux élevés de fumiers (80 tonnes ha⁻¹ an⁻¹) et une population de plantes dense (160 000 plantes ha⁻¹) (Silva, 2012). Cependant, la productivité moyenne des petits systèmes agricoles est inférieure, due à la plus faible fertilisation, une population de plantes moins dense et l'absence de contrôle des adventices. Les données rapportées par Silva (2012) reflètent le rendement potentiel des cactus dans les régions semi-arides. Une productivité d'un verger de cactus de 20 tonnes MS ha⁻¹ an⁻¹ (Santos *et al.*, 2000) est suffisante pour nourrir 4-5 vaches par an. Dans la même zone, 15 ha de pâturages sont nécessaires pour nourrir un seul animal par an, signifiant que la productivité des cactus est potentiellement 60 à 75 fois plus élevée. Une petite surface de cactus peut fournir suffisamment de fourrage pour nourrir le troupeau tout en réduisant la pression sur les ressources naturelles des pâturages.

Cependant, la productivité dans les systèmes à bas intrants peut être bien plus faible. Farias *et al.* (2005) rapportent une productivité de 1.5 tonnes MS ha⁻¹ an⁻¹

sans contrôle des adventices dans un champ de cactus. Les cactus associés avec une autre culture ont souvent une productivité réduite. Farias *et al.* (2000) rapportent une productivité des cactus de 2.2-3.4 tonnes MS ha⁻¹ an⁻¹ avec 5 000 plantes ha⁻¹ associées avec du *Sorghum bicolor* (L.) Moench. En conclusion, la productivité varie avec les intrants et les systèmes ; le producteur doit prendre en compte la disponibilité des terres et la valeur économique des intrants et des productions quand il décide quel système est le plus adapté à des conditions particulières.

QUALITÉ DU FOURRAGE

Éléments nutritifs

Les cladodes de cactus (*Opuntia* spp.) ont des teneurs élevées en eau, sucres, cendres et vitamines A et C, mais ils ont une faible teneur en protéines brutes (PB) et en fibres (Ben Salem *et al.*, 1996 ; Le Houérou, 1996a ; Battista *et al.*, 2003a, b). Ils présentent un ratio Ca-P élevé et sont hautement appétents (Tegegne, 2001 ; Nefzaoui et Ben Salem, 2001). Cependant de nombreux auteurs (par exemple : Le Houérou, 1996a ; Azocar, 2001 ; Nefzaoui et Ben Salem, 2001 ; Tegegne, 2001) ont démontré une variabilité significative dans la valeur nutritionnelle des cladodes de différentes espèces et cultivars. La valeur nutritive varie aussi selon la saison, les conditions agronomiques et le jeu de techniques adopté (texture du sol, précipitations, fertilisation, etc.). Selon Le Houérou (1996a), les cladodes de 1 à 3 ans ont une teneur élevée en eau pendant l'hiver et le printemps (85-90%) et moins en été (75-85%), et plus les cladodes sont jeunes plus la teneur en eau est élevée. Les cladodes en fourrage peuvent résoudre des problèmes d'abreuvement des animaux, mais une attention particulière devrait être donnée à leur faible teneur en matière sèche par rapport à leur alimentation. Pour compenser le faible taux de matière sèche, les ruminants consomment une grande quantité de cladodes, ce qui peut engendrer des diarrhées. Il est par conséquent recommandé d'associer des composés alimentaires fibreux et aussi des compléments appropriés, en particulier riches en azote.

Comparé à une alimentation conventionnelle, les cladodes d'*Opuntia* ont une teneur élevée en cendres (Sawyer *et al.*, 2001). En fonction de l'espèce et du cultivar, la teneur en cendres varie de 100 à 250 g kg⁻¹ MS, mais excède souvent 200 g kg⁻¹ MS. Le Ca - suivi par le K - est l'élément minéral le plus présent dans les cladodes, mais la disponibilité du Ca pour la microflore du rumen et l'animal hôte est compromise par la teneur élevée en oxalate et les ratios Ca-P extrêmement élevés. Cultivés dans le nord du Brésil, les cladodes d'*Opuntia* cv. 'Gigante', de *Nopalea* cv. 'Muida' et d'*Opuntia* cv. 'IPA-20' contiennent 120 à 145 g kg⁻¹ MS de cendres, 29 à 42



g kg⁻¹ MS de Ca et 3 à 4 g kg⁻¹ MS de P (Batista *et al.*, 2003b). Les données sur les oligoéléments sont rares ; néanmoins, les concentrations en fer, cuivre et manganèse semblent être dans la norme recommandée pour l'alimentation des ruminants (Abidi *et al.*, 2009b).

On a bien documenté le fait que les cladodes ont une faible teneur de Protéines Brutes (PB). Dans les conditions Tunisiennes, les cladodes d'*O. ficus-indica* f. *inermis* contiennent 30 à 50 g kg⁻¹ MS de PB. La majeure partie de l'azote total (AT) est sous une forme soluble (865 g kg⁻¹, Ben Salem *et al.*, 2002a). Plus le cladode est vieux, plus la teneur en PB est faible. Par conséquent, dans une alimentation contenant du cactus, les compléments azotés sont obligatoires pour assurer une activité microbienne normale dans le rumen et pour améliorer les performances du bétail. La littérature suggère diverses possibilités pour résoudre le problème de la faible teneur en N des cladodes de cactus :

- Ajouter des compléments azotés (tourteaux de soja, urée, feuilles d'*Atriplex nummularia*, etc.) dans les rations contenant du cactus, est actuellement l'option la plus largement adoptée et des réponses encourageantes ont été observées chez le mouton. Les exemples sont rapportés dans le **Tableau 4**.
- Apporter de l'engrais chimique (ammoniac et superphosphate) a augmenté la teneur en PB de 45 à 105 g kg⁻¹ MS (Gonzalez, 1989).
- La sélection a réussi à augmenter la teneur en PB des cladodes (Felker *et al.*, 2006). Les cladodes du clone de cactus sans épines sélectionné (clone TAMUK accession 1270) signalé par Peter Felker ont révélé des teneurs de PB plus élevées (100 g kg⁻¹ MS) que la normale (30 à 50 g kg⁻¹ MS).
- L'ensilage est recommandé comme alternative pour l'enrichissement en protéines des cladodes (Araújo *et al.*, 2005), bien que la recherche sur la technique en soit encore au stade laboratoire. Une analyse coût-bénéfices est nécessaire de manière à améliorer l'adoption de cette technique par les fermiers.

Les cladodes de cactus ont une teneur élevée en glucides (environ 600 g kg⁻¹ MS), en amidon (environ 75 g kg⁻¹ MS) et en β -carotène (environ 6.5 mg kg⁻¹ MS) (Ayadi *et al.*, 2009). Selon Abidi *et al.* (2009a), la teneur en mucilage est élevée dans les cladodes de cactus inerme (6-13 g kg⁻¹ matière fraîche) et épineux (6-14 g kg⁻¹ matière fraîche). La concentration de mucilage double au moins en été par rapport à celle en hiver. Elle réduit la salivation des ruminants, évitant ainsi une diminution rapide du pH du rumen. Ce phénomène a été confirmé par Ben Salem *et al.* (1996), qui ont rapporté des valeurs de pH du rumen de 6.3-6.8 pour des moutons nourris avec une alimentation à base de paille complétementée avec des niveaux croissants de cladodes de cactus inerme. Ces valeurs correspondent

aux valeurs optimales de pH (6.5-7) recommandées pour une croissance et une activité normale de la microflore dans le rumen. Les autres aliments riches en glucides solubles tels que la mélasse, causent l'acidose chez les ruminants, parce qu'ils ont peu ou pas de mucilage. En tant que plante succulente, les cladodes de cactus ont une teneur faible en fibre. En général, les fibres insolubles dans les détergents neutres (NDF) des parois cellulaires varient entre 180 et 300 g kg⁻¹ MS, bien que les cladodes d'un cactus épineux (*Opuntia imbricate*) contiennent 400 g kg⁻¹ MS de NDF. La lignocellulose (fibres insolubles dans les détergents acides - ADF, 120-200 g kg⁻¹ MS) et la lignine (Lignine insoluble dans les détergents d'acide sulfurique - ADL, 15-40 g kg⁻¹ MS) sont aussi en faibles quantités. Les teneurs en carotènes, en acidité titrable et en glucides augmentent pendant le développement, alors que les protéines et les fibres diminuent. Il est intéressant de remarquer que les cladodes ont une teneur élevée en acide malique et la teneur de cet acide oscille à cause du rythme diurne CAM. Plusieurs auteurs (Lila *et al.*, 2004 ; Mohammed *et al.*, 2004 ; Newbold *et al.*, 2005) ont conduit des études *in vitro* et *in vivo* pour montrer que l'acide malique réduisait les émissions de méthane. Par conséquent, on s'attend à ce que l'intégration du cactus dans l'alimentation du bétail puisse réduire la méthanogénèse, contribuant à une diminution globale des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, cette hypothèse requiert une validation par les scientifiques.

Facteurs anti-nutritifs

Comme beaucoup de plantes, les cladodes de cactus contiennent des composés phytochimiques sans effets préjudiciables apparents sur le bétail. Negesse *et al.* (2009) ont déterminé la teneur de certains facteurs anti-nutritifs dans les cladodes matures ou jeunes de cactus inerme (*O. ficus-indica*) poussant en Ethiopie et ont rapporté des teneurs totales en tannins respectives de 21 et 42 g d'équivalent acide tannique kg⁻¹ MS. Cependant, une très faible teneur en ces tannins (1 g d'équivalent acide tannique kg⁻¹ MS) a été signalée par Ben Salem *et al.* (2002a) sur la même espèce de cactus qui pousse en Tunisie. La teneur totale en oxalate varie entre 60 et 120 g kg⁻¹ MS. Abidi *et al.* (2009b) ont rapporté que les cladodes de cactus épineux ont une teneur plus élevée en oxalate (110-118 g kg⁻¹ MS) que les cactus inermes (102-105 g kg⁻¹ MS) poussant dans les zones arides de Tunisie. Que ces oxalates soient insolubles est une bonne chose puisqu'ils n'ont pas d'effet toxique. Cependant, il est connu que les oxalates insolubles forment des complexes avec le Ca et le Mg les rendant indisponibles pour la microflore du rumen et l'animal hôte. Selon Ben Salem *et al.*, (2002a) et Abidi *et al.* (2009b), les cladodes de cactus épineux et inerme ont une faible teneur en saponines (2-5 g kg⁻¹ MS), en phénols totaux (10-34 g kg⁻¹ MS), en



tannins totaux (1 g kg⁻¹ MS) et en tannins condensés (<1 g kg⁻¹ MS). Les auteurs n'ont pas connaissance de la présence, dans les cladodes de cactus, d'autres composés secondaires ayant un effet négatif potentiel sur la valeur nutritive et les performances et la santé des animaux.

Fermentation

Différentes techniques *in vitro* sont utilisées pour évaluer le potentiel de fermentation des cladodes de différentes espèces et cultivars de cactus.

La technique de production de gaz développée par Menke et Steingass (1988) utilisant des seringues de verre calibrées a été largement adoptée dans les laboratoires de recherche au cours de la dernière décennie. La digestion de la matière organique mène à la production d'acides gras volatiles (AGV), d'ammoniac et de différents gaz, principalement du dioxyde de carbone et du méthane. La technique est par conséquent basée sur l'hypothèse suivante : plus il y a de gaz produit dans le système *in vitro*, plus le substrat est digestible dans le rumen. Des équations ont été développées pour prédire la digestibilité et la teneur en énergie d'une large gamme d'aliments. Batista *et al.* (2003a) ont mesuré la production de gaz de trois cultivars de cactus inerme poussant dans le nord du Brésil ('Gigante', 'Muida' et 'IPA-20'). Ils ont rapporté des volumes élevés de production de gaz durant les 24 heures de fermentation de ces trois cultivars : 'Gigante' avait le plus grand (210 ml g⁻¹ MS), suivi par 'Muida' (202 ml g⁻¹ MS) et 'IPA-20' (195 ml g⁻¹ MS). Dans le sud de la Tunisie, des valeurs plus élevées de production potentielle de gaz ont été rapportées par Abidi *et al.* (2009b) pour des cladodes de cactus inerme (*O. ficus-indica* f. *inermis*) et épineux (*Opuntia amyclaea*) récoltés en hiver (138 et 140 ml g⁻¹ de matière organique [MO], respectivement) et en été (140 et 145 ml g⁻¹ MO, respectivement). Une production élevée de gaz dans les premières heures d'incubation est une caractéristique des aliments riches en glucides solubles, dont le cactus.

Des fermenteurs en culture continue à flux simple ont été utilisés par Abidi *et al.* (2009b) pour comparer les caractéristiques de fermentation des rations expérimentales composées de cladodes de cactus avec ou sans épines (17g), du feuillage d'*Atriplex nummularia* (12g) et de paille de blé (24g). Les deux rations (cactus sans/avec épines) ont présenté des valeurs similaires de pH, d'AGV totaux, de flux total d'azote, de bactéries effluentes et de bactéries associées à un solide ou un liquide isolées du contenu de la flasque. Cependant, l'alimentation avec du cactus épineux a montré un ratio acétate sur propionate plus élevé (P = 0.016) et un flux d'ammoniac plus faible (P = 0.007).

La technique de production de gaz a été adoptée par

Negesse *et al.* (2009) pour déterminer les paramètres de fermentation et la teneur en énergie métabolisable (EM) de quelques sources non-conventionnelles d'aliment, incluant les cladodes matures (CM) et les jeunes cladodes (JC) de cactus inerme poussant en Ethiopie. La teneur idéale en EM est 10 à 13.6 MJ kg⁻¹ MS, mais les CM et JC ont révélé une EM de 7.5 et 8.5 MJ kg⁻¹ MS respectivement et n'ont pas été considérés comme une bonne source d'énergie.

Consommation

Une quantité considérable d'informations sur la réponse de différentes espèces animales à une alimentation contenant du cactus est disponible. Les essais d'alimentation évaluent habituellement les cladodes de cactus inerme (ci-après désigné comme cactus) comme une source de fourrage alternative pour le nombre croissant de ruminants laitiers et autres. Le **Tableau 4** présente les informations issues de quelques études. Plus le cactus consommé est frais, moins l'animal boit de l'eau. La diminution de la consommation d'eau d'abreuvement par les différentes catégories de moutons et autres espèces animales (mâles, jeunes et génisses) est de 40 à 98% en fonction de la proportion de cactus dans l'alimentation. Gebremariam *et al.* (2006) ont signalé une diminution de 59% de la consommation d'eau d'abreuvement pour les agneaux ayant reçu une alimentation composée à 43% de cactus frais. De plus, dans une étude conduite en Ethiopie, les agneaux ont arrêté de boire de l'eau quand ils avaient accès à une alimentation contenant 55% de cactus frais (Tegegne *et al.*, 2007). Les plantations de cactus sont par conséquent une option prometteuse pour atténuer le manque d'eau d'abreuvement dans les zones sèches et pendant les périodes de sécheresse.

Le cactus est souvent utilisé pour compléter un fourrage de faible qualité, incluant la paille et la végétation des prairies. Son impact sur la consommation d'aliment est amélioré quand il est associé à une source de protéines. La consommation de matière sèche totale (MST) chez l'agneau recevant du foin de prairies et du cactus était 26% plus élevée que pour les agneaux nourris avec seulement du foin de prairies (Tegegne *et al.*, 2007). Le remplacement des sources d'énergie telles que les grains d'orge (Abidi *et al.*, 2009a) ou le maïs moulu (Costa *et al.*, 2012), par le cactus dans l'alimentation du mouton a augmenté la consommation de MST de 6% et de 25% respectivement. Remplacer l'orge dans les concentrés par du cactus augmente la consommation de MST de 26% chez la chèvre en développement (Abidi *et al.*, 2009a).

Digestibilité

Les aliments riches en glucides solubles tels que la mélasse et le cactus améliorent l'appétence de l'aliment et



TABLEAU 4 Ingestion, digestibilité *in vivo*, et taux de croissance des différentes espèces animales recevant une alimentation contenant du cactus.

Pays	Animal	Durée (jours)	Composition de l'alimentation (g MS jour ⁻¹)	Ingestion de l'eau (litres jour ⁻¹)	Ingestion de MST (g P ^{-0.75}) ^h	DMO (%) ^h	DPB (%) ^h	DNDF (%) ^h	SB ^h initial (kg)	Taux de croissance (g jour ⁻¹)	Ref. ⁱ
Ethiopie ^a	Agneau	97	508 paille de teff+58 TN	1.02	65.0	46	48	50	17.0	23	a1
	Agneau	97	273 paille de teff+58 TN+246 cactus	0.42	62.6	54	41	48	17.0	53	a1
Ethiopie	Agneau	90	685 foin de prairie	1.22	70.0	59	57	49	20.0	11	a2
	Agneau	90	404 foin de prairie+503 cactus	0.02	97.0	58	54	37	19.5	28	a2
	Agneau	90	218 foin de prairie+508 cactus	0.01	77.0	61	49	30	19.0	0.0	a2
Tunisie ^b	Agneau	70	435 paille d'orge+178 orge+157 SBM	3.05	72.1	69	73	68	19.5	108	b1
	Agneau	70	262 paille d'orge+157 FS+577 cactus	1.30	85.2	71	71	69	19.5	119	b1
Tunisie	Agneau	84	715 foin d'avoine+300 concentré	3.88	65.0	64	59	59	32.5	46	b2
	Agneau	84	544 foin d'avoine+295 cactus +67 concentré	2.47	68.9	65	59	66	32.5	39	b2
	Jeune	84	454 foin d'avoine+300 concentré	3.20	74.9	65	63	59	19.3	46	b2
	Jeune	84	488 foin d'avoine+346 cactus +67 concentré	1.38	94.5	67	64	59	19.3	24	b2
Brésil ^b	Agneau	35	400 foin de tifton+280 maïs broyé+176 FS+114 son de blé+15 sel+chaux	4.90	96.5	73	74	57	26.6	255	c1
	Agneau	35	400 foin de tifton 280 cactus +176 FS+114 son de blé+15 sel+chaux	2.30	102.1	83	87	77	27.9	231	c1
Brésil ^c	Mâle	21	250 foin de Cynodon+600 cactus	0.04	84.4	74	77	48	13.7		c2
	Mâle	21	125 foin de Cynodon+600 cactus +125 CS	0.06	79.1	75	78	51	31.7		c2
	Mâle	21	0 foin de Cynodon+600 cactus +250 CS	0.03	66.5	78	80	59	31.7		c2
Brésil ^d	Génisse		395 canne à sucre+93 maïs+479 SB		103.6		70	45			c3
	Génisse		390 canne à sucre+92 maïs+314 SB+163 cactus		107.4		76	47			c3
	Génisse		385 canne à sucre+91 maïs+156 SB+320 cactus		111.8		77	40			c3
	Génisse		381 canne à sucre+92 maïs+0 SB+469 cactus		103.4		80	37			c3
Indie ^e	Bélier	45	752 foin de Cenchrus+191 concentré		73.9		49	46	29.8		d
	Bélier	45	547 foin de Cenchrus+243 cactus		61.2		31	45	31.7		d
	Bélier	45	672 foin de Cenchrus+237 cactus +48 GNC		74.4		54	45	31.8		d
Afrique du Sud ^f	Agneau castré	63	660 foin de luzerne broyé+300 farine de maïs+40 farine de mélasse		90.6	73			33.9	118	e
	Agneau castré	63	410 foin de luzerne broyé+240 cactus broyé+300 farine de maïs+40 farine de mélasse+10 urée		89.2	76			33.9	116	e
	Agneau castré	63	285 foin de luzerne broyé+360 cactus broyé+300 farine de maïs+40 farine de mélasse+15 urée		88.3	78			33.9	96	e
Tunisie ^f	Agneau	60	482 cactus +190 paille	0.38	72.6	58	59	49	19.9	8	f
	Agneau	60	503 cactus +258 paille traitée à l'urée	0.42	78.7	64	66	63	19.9	20	f
	Agneau	60	513 cactus +198 paille+121 atriplex	0.44	85.0	65	72	65	19.9	31	f
	Agneau	60	362 paille+393 concentré	1.89	74.4	72	70	66	19.9	40	f

^a TN: Tourteau de noog (*Guizotia abyssinica*).

^b FS Farine de soja.

^c CS: Coque de soja.

^d SB: Son de blé. Les valeurs de consommation de matière sèche (g kg⁻¹ W0.75) ont été adaptées des données rapportées dans l'article correspondant.

^e TA: tourteau d'arachide.

^f Les valeurs de consommation de matière sèche (g kg⁻¹ W0.75) ont été adaptées des données rapportées dans l'article correspondant.

^g *Atriplex nummularia*. Les valeurs de consommation de matière sèche (g kg⁻¹ P0.75) ont été adaptées des données rapportées dans l'article correspondant.

^h MST: matière sèche totale. DMO : digestibilité de la matière organique. DPB : digestibilité des protéines brutes. DNDF : digestibilité totale des fibres (NDF).

ⁱ a1: Gebremariam *et al.* (2006). a2: Tegegne *et al.* (2007). b1: Ben Salem *et al.* (2004). b2: Abidi *et al.* (2009). c1: Costa *et al.* (2012). c2 : Souza *et al.* (2009). c3: Monteiro *et al.* (2014). d: Misra *et al.* (2006). e: Einkamerer *et al.* (2009). f: Ben Salem *et al.* (2002b).

la fermentation dans le rumen, amenant généralement à une augmentation de la consommation de MST et/ou de la digestibilité de l'alimentation. En fonction de la composition de l'alimentation, donner du cactus engendre une augmentation de la digestibilité apparente de la matière organique (MO) de l'alimentation ou n'a pas d'effet sur ce paramètre. Des études conduites en Ethiopie (Gebremariam *et al.*, 2006 ; Tegegne *et al.*, 2007), en Tunisie (Ben Salem *et al.*, 2004 ; Abidi *et al.*, 2009a) et au Brésil (Costa *et al.*, 2012) ont montré une augmentation de la digestibilité de la MO de la ration de 2 à 10 points pour les agneaux et les jeunes recevant du cactus en comparaison avec des rations sans cactus. Ce pourrait être le résultat d'une amélioration de la fermentation dans le rumen. L'apport de cactus aux agneaux Ethiopiens nourris avec de la paille de teff ou du foin de prairie a engendré une diminution de la digestibilité apparente des protéines brutes de l'aliment. Gebremariam *et al.* (2006) prétendent que la diminution de la digestibilité apparente des PB avec une augmentation du taux d'incorporation du cactus dans l'alimentation pourrait s'expliquer par la teneur totale du cactus en tannins. En effet, ces derniers ont une grande affinité avec les protéines, les rendant indisponibles pour la flore microbienne du rumen de l'animal hôte. Les auteurs n'ont pas connaissance d'autres études montrant les effets des tannins des cactus sur la digestion dans le rumen des ruminants ; l'interaction entre les tannins de cactus et les protéines n'a pas encore été étudiée *in vitro* ou *in vivo*. Dans les conditions Brésiliennes, Costa *et al.* (2012) ont remarqué une augmentation de 13 points la digestibilité des PB de l'alimentation des agneaux. Aussi au Brésil, Souza *et al.* (2009) ont rapporté des valeurs élevées de digestibilité de PB (77-80%) pour les mâles recevant du foin de Cynodon, du cactus et des coques de soja. Ben Salem *et al.* (2002b), Gebremariam *et al.* (2006) et Misra *et al.* (2006) n'ont observé aucun effet du cactus sur la digestibilité des fibres (NDF) de l'aliment. Costa *et al.*, (2012) ont signalé un impact positif du cactus sur la digestibilité des NDF - une augmentation de 20 points de la digestibilité des NDF avec un aliment contenant du cactus, comparé avec un aliment témoin (sans cactus) donné aux agneaux. En bref, l'apport de cactus n'a pas d'effets négatifs sur la digestibilité de l'aliment et peut même l'améliorer.

UTILISATION

Les cladodes de cactus et les fruits gâchés sont des aliments d'intérêt économique pour les ruminants. Les bénéfices de l'utilisation du cactus comme aliment sont bien documentés (Nefzaoui et Ben Salem, 2001 ; Ben Salem et Abidi, 2009).

Des plantations de cactus pour la production de fourrage (récolté) ou fourrage vert (directement pâturé par

le bétail ou les animaux sauvages) ont été développées en Sicile et en Afrique du Nord depuis le milieu du dix-neuvième siècle. Les agriculteurs ont souhaité stabiliser la ressource de fourrage dans les zones arides et semi-arides, où le manque de fourrage pendant l'été et l'automne est un facteur quasi-limitant pour les productions animales (Le Houérou, 2002). Ces plantations sont encore utilisées comme :

- élément de la ration de base journalière ;
- complément d'alimentation en été et en automne ;
- réserve tampon d'aliment pour les périodes de sécheresse durant 1 à 3 ans.

A l'opposé des autres cultures de fourrages et fourrages verts qui ont besoin d'être conservés (par exemple le foin ou l'ensilage), le cactus est une culture permanente toujours verte qui peut être utilisée le long de l'année. La manière naturelle et probablement la plus efficace d'utiliser le cactus est de couper les cladodes et les servir aux animaux sans aucune transformation. De plus, le cactus est riche en eau et joue un rôle crucial dans les environnements arides en tant que substitution à l'eau d'abreuvement. La production d'ensilage ou le séchage sont faisables mais ils entraînent des coûts supplémentaires en termes de manipulation, d'énergie et de mains d'œuvre.

Les différents usages sont soulignés ci-dessous, avec une attention particulière au pâturage direct, l'affouragement en vert, le séchage, l'ensilage et pour finir, les blocs d'aliment et leur potentiel pour utiliser les fruits de faible qualité.

Pâturage direct

Le pâturage direct des plantes se produit principalement sur les populations indigènes de cactus avec et sans épines. Il est actuellement pratiqué dans un petit nombre de pays (par exemple au Mexique), où les populations sauvages de cactus sont directement pâturées par le bétail. En Ethiopie, où le cactus est parfois invasif (par exemple dans la région du Tigré), il est aussi pâturé directement. Les chameaux et les bovins sont capables de pâturer intensivement les cactus épineux (**Figures 6 et 7**). Dans les plantations réalisées par l'Homme, le pâturage direct n'est pas recommandé parce qu'en général il engendre rapidement des dommages sur les plantes. L'option la plus efficace et bon marché est le pâturage avec une clôture électrique, où toute la biomasse d'un rang doit être complètement consommée avant que le bétail n'ait accès à un nouveau rang ; ainsi est évité le plus grand danger du pâturage direct (pertes et gaspillage parce que les cladodes ne sont consommés que partiellement) (Le Houérou, 2002).

Les épines dans les populations sauvages peuvent être brûlées directement avant le pâturage, comme cela est pratiqué au Texas. Maltsberger (1991) a conduit



Figure 6

Un chameau pâture un cactus épineux en Ethiopie

**Figure 7**

Un bovin pâture du cactus, « fighting bull ranch » à San Luis Potosí, Mexique (Crédit photo : Ali Nefzaoui)

**Figure 8**

Hachage à la main des cladodes de cactus sans épines en Tunisie (Crédit photo : Ali Nefzaoui)

**Figure 9**

Hachoir à cactus actionné à la main en Tunisie

**Figure 10**

Hachoir à cactus Ethiopien actionné à la main (Crédit photo : Ali Nefzaoui)

**Figure 11**

Machines de transformation du cactus au Brésil



une étude approfondie sur le coût économique de brûlage des épines en utilisant du propane et sur l'apport de cladodes brûlés au bétail. Ils ont constaté que 15 litres de propane par jour étaient nécessaires pour 14 vaches, et que 8 heures de travail par jour étaient requises pour préparer de l'aliment pour 200 animaux. Pluenneke (1990) a montré que le travail et le coût du carburant pour brûler les épines étaient significativement réduits quand la plantation est faite en rangs. Néanmoins, il y a encore un peu de gaspillage puisque le bétail piétine les portions brûlées des cactus ; l'affouragement en vert est donc préféré.

Technique de l'affouragement en vert

L'affouragement en vert est la technique la plus communément utilisée pour distribuer le cactus. Il évite le gaspillage et le pâturage excessif. Les cladodes de cactus avec et sans épines peuvent être récoltés et transportés à la grange, coupés, mélangés à d'autres aliments puis distribués dans les auges. Les épines doivent être brûlées avant la coupe et la distribution. Différents types de hachoirs sont disponibles sur le marché, allant du petit hachoir simple aux plus sophistiqués. En Afrique du Nord, le hachage des cactus est fait manuellement

avec des couteaux et toute la famille aide, spécialement les femmes et les enfants (**Figure 8**). En Tunisie et en Ethiopie, des hachoirs transportables, à faible coût sont fabriqués localement (**Figure 9 et 10**) et sont tournés manuellement. Des hachoirs plus sophistiqués et motorisés sont utilisés au Brésil et au Mexique (**Figure 11**). En plus de réduire le gaspillage, les tranches de cactus sont plus faciles à incorporer dans le mélange d'aliments.

Séchage

Dans certaines circonstances, les cladodes de cactus sont hachés en petites tranches puis séchés à l'air, par exemple, quand la période de récolte est courte (taille des plantations de cactus pour les fruits) ou quand l'objectif est de produire un aliment commercial ou de mélanger les cladodes avec d'autres ingrédients. Dans tous les cas, le séchage au soleil est recommandé pour éviter d'utiliser des carburants couteux qui augmenteraient les coûts de production. Une fois séché, le cactus est broyé pour produire de la farine de cactus - en évitant de broyer trop finement car la farine pourrait transiter trop rapidement dans l'intestin. Parfois, les cladodes sont séchés pour réduire leur teneur élevée en eau (85-90%), sur la base que la consommation du cactus frais rend les fèces très humides. Cependant, les découvertes de De Waal *et al.* (2013) réfutent cette hypothèse : elles montrent que, même quand les animaux sont nourris avec du cactus séché, les fèces restent humides à cause de la présence de mucilage.

Le séchage de cactus est principalement pratiqué au Brésil et en Afrique du Sud. Plusieurs études (Zeeman, 2005 ; Einkamerer, 2008 ; Menezes, 2008) confirment que les cladodes d'*Opuntia* séchés au soleil et grossièrement broyés peuvent remplacer une large proportion de foin de luzerne dans l'alimentation des jeunes agneaux

Dorper. De Waal *et al.* (2013a) ont étudié le potentiel commercial des cladodes de cactus séchés au soleil (*O. ficus-indica*) pour l'aliment d'engraissement des agneaux castrés Dorper (**Tableau 5**). Ils ont montré qu'il n'y a pas de différence significative dans les caractéristiques de carcasse et ont suggéré que la qualité de carcasse n'était pas affectée par l'incorporation de cladodes de figuier de Barbarie (*O. ficus-indica*) séchés au soleil et grossièrement broyés dans l'alimentation ou par le type de source d'azote. D'autre part, les différences de gain moyen quotidien entre les alimentations basées sur le cactus montrent l'importance d'une source d'azote de qualité élevée pour les agneaux. Ces résultats indiquent de bonnes perspectives pour la commercialisation de cladodes d'*Opuntia* séchés au soleil dans une alimentation équilibrée pour les ruminants.

Deux formes de préparation du cactus : coupé au couteau (CC) et tranché avec un hachoir à fourrage (HF), et deux stratégies différentes de distribution : en concentré séparé (CS) et en ration totale mélangée (RTM), ont été étudiées par Da Silva *et al.* (2010). Ils ont surveillé le comportement alimentaire de vaches laitières et ont conclu que la préparation du cactus dans le hachoir à fourrage était recommandée pour maximiser la consommation de matière sèche et éviter l'altération de la composition du lait. La stratégie d'alimentation en RTM est recommandée pour réduire le tri par les vaches, qui engendre un déséquilibre entre l'alimentation offerte et celle consommée.

Ensilage

Dans certaines circonstances, il peut être nécessaire de faire de l'ensilage de cladodes de cactus : quand la production est concentrée sur une période courte (taille) ; ou quand des sous-produits agroindustriels ne peuvent



TABLEAU 5 Composition des alimentations (T0, T1 et T2) données à de jeunes agneaux castrés Dorper (adapté de De Waal *et al.*, 2013a)

Ingrédient de la ration (kg de matière séché à l'air)	Rations ^a		
	(g kg ⁻¹)		
	T0	T1	T2
Cladodes d' <i>Opuntia</i> séché au soleil et grossièrement broyé	–	330	300
Foin de luzerne grossièrement broyé	577	255	190
Farine de maïs jaune	358	340	275
Urée de qualité alimentaire	10	20	–
Farine de tourteau de tournesol	–	–	180
Farine de mélasse (Enermol)	40	40	40
Calcium alimentaire	15	15	15
Gain moyen quotidien (GMQ) en poids (g)	181a	125b	181a
Coût de l'alimentation tête ⁻¹ jour ⁻¹ (N\$)	3.71a	2.73b	3.26b

^a T0 alimentation conventionnelle du parc d'engraissement. T1 et T2 : alimentations à base d'*Opuntia* avec différentes sources d'azote (T1 - azote non protéique ; T2 - protéines naturelles). Les moyennes suivies par la même lettre (a/b), dans la même ligne, ne diffèrent pas ($P > 0.05$) au test de Tukey. N\$ = Dollar Namibien (1 N\$ ≈ 0.072 US\$).

pas être entreposés pendant un long temps et doivent être valorisés. Pour faire de l'ensilage de haute qualité, une bonne fermentation lactique est nécessaire, requérant un taux d'humidité approprié (30-40%) et des sucres dans un milieu totalement anaérobie. Les cladodes de cactus contiennent suffisamment de glucides pour une bonne fermentation lactique, mais leur forte teneur en eau fait qu'ils doivent être soigneusement mélangés avec une autre matière (par exemple : de la paille broyée ou du son).

Abidi *et al.*, (2013) ont conduit une expérience en Tunisie où l'industrie de l'olive est bien développée. Ils ont testé le potentiel d'ensilage d'un mélange de cladodes hachés (350 kg), de grignon d'olive (sous-produit de l'extraction de l'huile d'olive, 400 kg) et du son de blé. Le mélange a été ensilé pendant 75 jours puis distribué avec un complément de concentré (75% de grains d'orge et 25% de farine de soja) aux agneaux. Trois rations ont été comparées :

- Ration 1 (témoin : foin d'avoine ad libitum et 400 g d'aliment concentré)
- Ration 2 (ensilage et 400 g d'aliment concentré)
- Ration 3 (50% la ration 1 et de l'ensilage)

Les quantités d'aliment distribuées ont été ajustées pour obtenir des rations de même énergie et de même teneur en azote. L'ensilage obtenu était de bonne qualité avec un pH de 4.5. Le gain moyen quotidien des agneaux et la qualité de la viande étaient similaires pour les trois rations.

Blocs alimentaires

Dans plusieurs pays, en Tunisie en particulier, de grandes quantités de fruits de cactus ne sont pas récoltées à cause de leur faible qualité ou du coût du travail. Les fruits à sur-maturité attirent la mouche *Ceratitis capitata*, aussi appelée « mouche méditerranéenne des fruits », qui peut causer des dommages importants sur une large gamme de cultures fruitières. Par conséquent, les producteurs sont encouragés à collecter ces fruits et à les incorporer dans les blocs alimentaires pour le bétail. Différentes formules ont été développées basées sur le remplacement de la mélasse par des fruits de cactus. Chermiti (1998) a étudié le potentiel des fruits de cactus comme ingrédient de blocs alimentaires et a évalué la consommation volontaire des génisses et des brebis recevant une alimentation basée sur un foin d'avoine et de vesce complétement avec deux sortes de blocs d'aliment (un contenant des fruits de cactus, l'autre de la mélasse). Il conclut que la consommation volontaire des deux espèces animales était identique pour les deux types de blocs alimentaires. Ben Salem *et al.* (2003) ont mélangé des fruits de cactus transformés (90 g kg⁻¹ MS) avec du tourteau d'olive (367 g kg⁻¹ MS),

du son de blé (243 g kg⁻¹ MS), de la chaux (154 g kg⁻¹ MS), de l'urée (73 g kg⁻¹ MS) et du sel (73 g kg⁻¹ MS) pour faire des blocs alimentaires. Ils ont complétement les blocs alimentaires avec du feuillage de chêne (*Quercus coccifera*, une espèce buissonnante contenant des tannins) pour améliorer la valeur nutritionnelle (ingestion totale, matière organique et digestibilité des fibres de l'aliment, et rétention de l'azote) de l'aliment des chèvres. L'administration de petites doses de polyéthylène glycol dans les blocs alimentaires engendre une amélioration significative des paramètres mentionnés ci-dessus, conséquence de la désactivation des tannins du chêne par ce réactif.

PERFORMANCES DES ANIMAUX ET QUALITÉ DES PRODUITS

Productivité

Dans de nombreux articles, les auteurs concluent que compléter un fourrage de faible qualité avec du cactus frais augmente le gain moyen quotidien (GMQ) des ruminants en croissance. La réponse est encore plus positive quand une source d'azote est fournie (**Tableau 5**). Remplacer environ 50% de la paille de teff par du cactus a augmenté le GMQ des agneaux Ethiopiens de 23 à 53 g jour⁻¹ (Gebremariam *et al.*, 2006). Dans les conditions Tunisiennes, la substitution des grains d'orge par du cactus a augmenté le GMQ des agneaux de la race Barbarine de 108 à 119 g jour⁻¹ (Ben Salem *et al.*, 2004). On devrait mentionner que dans les deux études, l'alimentation à base de cactus incluait des compléments de protéine (tourteau de noog et farine de soja, respectivement). On considérait comme tolérable toute faible diminution du taux de croissance des agneaux ayant une alimentation contenant du cactus, en prenant en compte le faible coût de production pour les petits agriculteurs et en considérant que le cactus est disponible toute l'année (Einkamerer *et al.*, 2009 ; Costa *et al.*, 2012). Bien que l'association de cactus avec de la farine de soja ait produit un GMQ de 119 g jour⁻¹ pour les agneaux Barbarine, Ben Salem *et al.* (2004) ont préféré une alimentation composée de ressources disponibles localement (c'est-à-dire : de la paille de céréales, du cactus et du feuillage d'*Atriplex nummularia*) pour deux raisons : i) c'est moins cher qu'une alimentation contenant des grains d'orge et de la farine de soja ; ii) les arbustes apportent des bénéfices supplémentaires (par exemple : fixation du sol et production de fruits).

Pour résumer, le cactus peut améliorer la valeur nutritive d'une alimentation de faible qualité (par exemple des rations à base de paille) à cause de sa teneur élevée en glucides solubles. Il peut aussi augmenter le gain



de poids des petits ruminants et des génisses nourries avec des résidus de culture ou des pâturages de faible qualité, à condition qu'une source d'azote soit incluse en petite quantité dans la ration.

La plupart des études sur les effets de l'alimentation à base de cactus sur la production de lait et sa qualité ont été menées au Brésil. Le cactus est hautement pris en compte pendant les périodes de sécheresse et de manque d'eau. Des cactus épineux sont donnés au bétail dans le nord du Mexique et dans le sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique (Maltsberger, 1991). C'est une source bon marché de fourrage pour le bétail et elle est fréquemment utilisée par les éleveurs et les producteurs laitiers dans ces zones. Le cactus épineux est traditionnellement inclus dans l'alimentation des ruminants, leurs épines sont brûlées sur les plantes de figuier de Barbarie en utilisant un lance-flamme au propane. Puisque les cactus inermes se sont largement disséminés au cours des dernières décennies, beaucoup de fermiers utilisent maintenant le cactus dans l'alimentation des troupeaux laitiers. Selon les fermiers du nord du Brésil, des vaches Holstein nourries avec une ration mixte avec 60% de cladodes hachés frais, 20% d'aliment fibreux (foin ou paille) et 20% de concentré riche en protéine, produisent environ 20 litres jour⁻¹ de lait (H. Ben Salem, observation personnelle). Oliveira *et al.* (2007) ont étudié la valeur de remplacement du cactus (0, 12, 25, 38 et 51%) sur le maïs aplati et le foin de *Cynodon* destiné aux vaches laitières élevées dans le nord du Brésil. Basé sur leurs résultats, le cactus peut remplacer totalement le maïs aplati et partiellement se substituer au foin (environ 40%) sans aucun effet significatif sur la production de lait (20.3-21.8 kg jour⁻¹).

Plusieurs expériences dans le nord du Brésil montrent que la farine de cladodes de cactus séchés peut remplacer le maïs dans l'alimentation de l'agneau (Véras *et al.*, 2002). Quatre niveaux de substitution du maïs (0, 25, 50 et 75%) ont été testés et les résultats montrent qu'il n'y a aucun effet du niveau de remplacement sur la digestibilité de la matière sèche, de la matière organique ou des fibres. Véras *et al.*, (2005) ont aussi testé les effets de remplacement (0, 33, 67 et 100%) sur les performances des agneaux en croissance dans les parcs d'engraissement ; ils ont trouvé que le gain de poids vif et le ratio aliment-gain ont diminué, alors que la consommation de NDF et d'ADF a augmenté linéairement avec le remplacement du maïs. La consommation de matière sèche, de protéines brutes, de matière organique et de glucides totaux et le rendement de carcasse n'étaient pas affectés par le remplacement du maïs avec de la farine de cactus.

Qualité du produit

En prenant en considération les préférences des consommateurs et la santé humaine, une partie de la littérature traite des effets de la fourniture de cactus sur la qualité de la viande. Abidi *et al.*, (2009) ont conclu que le remplacement de l'orge par du cactus comme complément d'énergie pour l'alimentation des chevreaux et des agneaux de Barbarie locaux ne produisait pas de changement majeur dans la composition des acides gras intramusculaires de la viande. Cependant, de l'acide vaccénique a été trouvé à des taux plus élevés pour les bêtes avec une alimentation à base de cactus. Cet acide gras - pareil aux acides gras conjugués - a un impact positif sur le système cardiovasculaire. Alors que du fourrage grossier (foin d'avoine) était utilisé en aliment de base dans le travail de recherche rapporté par Abidi *et al.* (2009), Atti *et al.* (2006) ont analysé la qualité de la viande des jeunes recevant du cactus dans une alimentation à base de concentré complémentée avec une petite quantité de foin d'avoine. Les auteurs rapportent que l'alimentation avec du cactus a engendré une augmentation de la proportion d'acides linoléique, linoléinique et de linoléique conjugué. Ils ont aussi obtenu une proportion plus élevée d'acides gras polyinsaturés (AGPI) et un ratio AGPI sur acides gras saturés (AGS) plus élevé. Les deux études confirment que le cactus inclus dans l'alimentation des moutons et des chèvres améliore la qualité de la viande selon la préférence du consommateur : plus d'AGPI et moins de AGS. Dans les conditions du nord du Brésil, Santos *et al.* (2011) ont évalué le taux de muscle et de tissus adipeux de carcasses d'agneaux Santa Ines recevant de la farine de cactus en remplacement du maïs broyé ; il n'y avait pas d'effet sur la carcasse avant éviscération, le rendement biologique (ratio du poids de la carcasse avant éviscération sur le poids de la carcasse vide) ou sur la proportion de gras nécessaire pour assurer une préservation adéquate de la carcasse.

Oliveira *et al.* (2007) ont conclu que l'alimentation avec du cactus n'affectait pas la production de lait pour un troupeau laitier recevant une quantité de plus en plus élevée de cactus. Cependant, cela changeait significativement la composition du lait, en particulier le profil d'acides gras. En effet, l'apport de cactus a réduit la proportion d'acides stéarique et oléique, mais n'a pas affecté les autres acides gras à longue chaîne, tels que les acides linoléique (C18:2) et linoléinique (C18:3).



Figure 12

Vaches laitières dans l'état de Pernambuco au Brésil, se nourrissant de cactus haché mélangé à de l'ensilage et de l'aliment concentré
(Crédit photo : Djalma Santos)



PERSPECTIVES FUTURES ET BESOIN DE RECHERCHE

Le réchauffement global, le changement climatique et les populations humaines et de bétails en augmentation requièrent tous une utilisation plus efficace des systèmes en terres arides. Des cultures pérennes adaptées avec une plus forte productivité par unité de surface sont nécessaires pour protéger de la dégradation les systèmes de pâturages naturels. Le cactus s'insère bien dans ce scénario, avec une productivité 60-75 fois plus grande que les pâturages naturels. Une petite culture intensive de cactus peut atténuer la pression sur les ressources naturelles des pâturages, en réduisant leur dégradation. Au même moment, plus de produits animaux (par exemple viande et lait) produits par du bétail nourri au cactus, peut atténuer la faim, augmenter la sécurité alimentaire et la résilience des populations vivant dans les régions arides. Il y a de nombreuses histoires de réussite dans divers pays et des technologies sont disponibles pour aider les autres régions avec des environnements similaires. Les décideurs politiques doivent être interpellés sur les bénéfices du cactus en tant que fourrage mais aussi pour ses bénéfices environnementaux ; ils devraient établir des politiques pour augmenter les surfaces plantées en conséquence. Du travail

de recherche et développement est nécessaire dans cette zone et un soutien amélioré des donateurs, politiques et des scientifiques peut aider à atteindre une plus grande utilisation du cactus dans les zones sèches. Il est aussi vital d'accroître la collaboration entre les équipes de recherche internationales.

Les informations actuellement disponibles sur le cactus pour la production de fourrage sont adéquates pour mettre en place des systèmes fonctionnels dans différentes zones. Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour augmenter les connaissances sur les biotechnologies, sur les interactions génotype x environnement et les systèmes d'alimentation adaptés localement utilisant du cactus et des ingrédients locaux, et pour améliorer l'efficacité de l'utilisation des cactus dans différents systèmes de production de bétail. Il est nécessaire d'être prudent pour éviter l'introduction d'espèces invasives. L'utilisation de cactus inerte pour la production de fourrage a besoin d'être encouragée. Les insectes et les maladies sont aussi un problème dans des zones localisées ; il est nécessaire de générer et promouvoir des variétés tolérantes aux maladies pour gérer ce problème. Par conséquent, la conservation des ressources génétiques et la promotion de coopérations multilatérales sont essentielles pour traiter ces défis.

Nopalitos ou cactus légume, production et utilisation

Candelario Mondragón Jacobo^a et Santiago de Jesus Méndez Gallegos^b

^a Faculté de Sciences Naturelles, Université Autonome de Querétaro, Juriquilla Querétaro, Mexique

^b Collège supérieur, Campus de San Luis Potosí, Mexique



INTRODUCTION

Un des grands défis des pays sous-développés et en développement est de trouver un moyen d'atteindre la sécurité alimentaire sans compromettre la base des ressources naturelles, sous la menace permanente de la tendance globale de l'augmentation de la population et du changement climatique. La croissance démographique exerce une pression supplémentaire sur les ressources en eau et les terres, avec une compétition pour les terres de meilleure qualité et les sources d'eau potable, puisque ces atouts sont continuellement retirés des productions agricoles et dédiés aux besoins du développement urbain. En conséquence, moins de terres et d'eau sont disponibles pour la production agricole, menant au dilemme : l'incorporation des prairies et des forêts dans l'agriculture ou bien une réduction du développement. La recherche de cultures alternatives et de technologies agricoles efficaces est clairement une approche raisonnable.

Les cultures ayant des mécanismes intégrés leur conférant de l'efficacité d'utilisation d'eau, la capacité de croître dans des sols contraignants, et la tolérance au froid et à la chaleur, ont été le fer de lance des sciences agricoles depuis la seconde moitié du siècle dernier, quand les effets de la croissance de la population humaine et des politiques insuffisantes de gestion des ressources sont devenus plus évidents. Le figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*), une plante originaire des plateaux semi-arides du centre du Mexique et introduite, en tant que curiosité, dans le reste du monde depuis le seizième siècle, reçoit une attention croissante de la part des gouvernements, des organisations non-gouvernementales (ONG) et des particuliers. Il se présente régulièrement comme une alternative sérieuse pour l'utilisation des terres semi-arides affectées par la désertification naturelle et celle provoquée, à travers les régions tropicales et subtropicales semi-arides.

Le figuier de Barbarie est principalement connu comme culture fruitière et il est lentement en train d'obtenir le statut de culture officielle dans les statistiques mondiales. Les données estimées indiquent qu'il est présent à l'échelle commerciale dans plus de 20 pays, couvrant une superficie plantée d'environ 150 000 ha (estimation personnelle). La culture et l'utilisation de cactus pour le fourrage est destinée à suivre la même voie, puisque la consommation de protéines d'origine animale continue à augmenter. De plus, la culture comme fourrage est plus simple à adopter,

pour les systèmes de production animale commerciale et pastorale; la culture de cactus pourrait aider à réduire la destruction des prairies naturelles.

L'utilisation de cladodes tendres, connus des consommateurs mexicains sous le nom de *nopalitos*, comme légume est originaire du centre du Mexique où il a évolué. Leur consommation est profondément ancrée dans la culture gastronomique du pays puisque le figuier de Barbarie est facile à cultiver et a une forte productivité. La tendance est vouée à augmenter, encouragée par de récentes découvertes quant à leurs propriétés fonctionnelles (discutées en détail dans ce livre). Les *nopalitos* représentent un exemple unique de l'ancienne sagesse horticole mexicaine : en utilisant la structure végétative, renouvelée par une récolte continue, les fermiers exploitent les effets physiologiques de la taille, sécurisant des légumes verts de valeur toute l'année, dans une région dominée par un cycle climatique bimodal de saisons sèches et humides.

L'introduction de *nopalitos* légumes dans d'autres pays et cultures n'a pas été facile, malgré l'adaptabilité de la plante et sa productivité élevée dans la plupart des lieux. La présence d'épines - même les cultivars dits « sans épines » présentent des épines quand ils sont jeunes - l'abondance de mucilage et le manque d'attrait organoleptique des *nopalitos* cuits ont limité leur adoption. De petits vergers de *nopalitos* se retrouvent aux États-Unis d'Amérique, principalement en Californie, au Texas et en Arizona ; ils produisent des quantités limitées destinées aux marchés des fermiers locaux, visant les consommateurs d'origine hispanique.

Ce chapitre décrit la domestication du figuier de Barbarie et présente les variétés et les systèmes de production - de la culture en plein champ à la production sous serres - ainsi que des techniques culinaires de base.

PREMIÈRE UTILISATION ET DOMESTICATION

Dans les premiers temps de l'utilisation du figuier de Barbarie, l'organe d'intérêt était le fruit; en effet, la consommation de fruits mûrs a été documentée à travers les coprolithes retrouvés dans des cavernes, démontrant que les fruits faisaient partie de l'alimentation des anciennes tribus mexicaines (Hoffmann, 1995). D'autre part, il n'y a pas de traces de la consommation de raquettes tendres:

à cause de sa périssabilité, il n'y a pas de restes sur les sites archéologiques. On peut supposer que les premiers Mésoaméricains suivaient les routes de cueillette des fruits de cactus, et quand les fruits devenaient rares, ils se seraient tournés vers les jeunes cladodes succulents comme source d'eau pour étancher leur soif. Ils étaient probablement utilisés comme aliment d'urgence en temps de manque de fruits - une situation fréquente dans les climats semi-arides rudes prédominant au centre du Mexique et exacerbée par l'habitude de fructification alternée de la plante. Ils ont peut-être grillé les cladodes pour en éliminer les épines - essentiel pour en faciliter la consommation.

Plus tard, une part importante du processus de domestication a été l'identification, l'entretien et la propagation des plantes sans épines, un trait mutant qui limite la survie de la plante dans son environnement naturel (Colunga Garcia *et al.*, 1986). Tous les jeunes cladodes, quelles que soient la variété et l'espèce, présentent des épines et des glochides. Seuls les cladodes matures peuvent être sans épines, permettant une manipulation plus facile. Les variétés modernes de *nopalito* légume sont toutes inermes et ont été obtenues à l'origine dans des vergers familiaux.

Les nouvelles demandes des marchés modernes, moins dépendants de la production locale et de la disponibilité saisonnière, ont mené à une augmentation de l'intérêt pour la production hors-saison (idéalement, toute l'année). Les zones cultivées ont

été par conséquent étendues à des zones à hivers doux ou de climat subtropical et, plus récemment, aux diverses formes de serres. Etant donné son statut original de culture émergente convenable aux producteurs ayant des ressources limitées et aux sites de faible productivité, les systèmes de production en serres de *nopalitos* ont graduellement évolué de simples aux plus sophistiqués. Trois principaux types sont utilisés au centre et au nord du Mexique et sont décrits plus tard dans ce chapitre.

VARIÉTÉS DE NOPALITO LÉGUME

A l'opposé de la large gamme disponible pour la production de figues de Barbarie, les variétés commerciales pour la culture en légume sont limitées à 'Milpa Alta', 'Atlixco' et 'COPENA V1' ; elles sont décrites ci-dessous.

'Milpa Alta' *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

Cultivar indigène, il est probablement originaire de l'état d'Hidalgo, Mexique, et y a été domestiqué (Reyes Agüero *et al.*, 2004). Le nom commercial 'Milpa Alta' fait référence à la région du même nom localisée à la périphérie de la ville de Mexico où la production intensive de *nopalitos* a commencé. Il s'est répandu à travers le Mexique, couvrant 7 500 ha selon les estimations. Ses cladodes vert brillant, plats, fins, faciles à peler



Figure 1
Variétés de nopalito
(dans le sens horaire :
'Milpa Alta' ; 'Atlixco'
ou 'Negrito' ; 'Blanco' ;
'Valtierrilla')

et sa tendreté sont appréciés par les marchands et les consommateurs. Il est planté en plein champ ou sous des abris plastiques et peut être conduit en agriculture pluviale ou en irrigué dans les zones sèches. La plante est robuste, dressée avec des cladodes oblongs, très productivemais sensible au froid. Le fruit est moyen-grand, avec une pulpe et une peau jaune-orange, peu juteux, avec des graines de taille moyenne. Il est bien adapté au climat semi-aride subtropical et aux basses terres subtropicales (Gallegos et Mondragón Jacobo, 2011). Cette variété est similaire aux cultivars inermes de fruits jaunes-oranges présents dans les autres parties du monde : en Italie, au Maroc, en Tunisie et en Afrique du Sud (**Figure 1**).

'Atlixco' *O. ficus-indica* (L.) Mill.

Cette variété est originaire des hauts plateaux du centre du Mexique, mais elle a été baptisée 'Altlixco', le nom de la ville où sa culture a commencé. De nos jours, on estime que 800 ha en sont plantés, principalement dans les états voisins de la ville de Mexico. La plante est vigoureuse, droite, avec des cladodes rhombiques inermes de couleur verte intense et de qualité exceptionnelle. Les *nopalitos* tendres sont faciles à nettoyer, avec une forme ovoïdale et plus épais que ceux de 'Milpa Alta'. Les fruits sont grands (atteignant plus de 180 g) avec une peau orange et une pulpe jaune; la qualité alimentaire est acceptable mais inférieure à celle d'un cultivar standard à fruits. Les cladodes matures sont bien acceptés comme fourrage. Il est très productif en culture intensive, atteignant 400 tonnes ha⁻¹ an⁻¹ de matière fraîche (Gallegos et Mondragón Jacobo, 2011), et il est bien adapté à la culture en champs dans les hauts plateaux sous des tunnels plastiques (**Figure 1**).

'COPENA V1' *O. ficus-indica* (L.) Mill.

En termes de souches commerciales pour la production de légumes, 'Copena V1' est le seul génotype amélioré, obtenu par feu Dr. Facundo Barrientos au Collège Supérieur de Chapingo au Mexique. La plante est vigoureuse, à croissance rapide et avec une habitude de croissance érigée; les cladodes sont obovales, de taille moyenne, et inermes. Bien que sélectionné pour la production de légumes, ses fruits sont attractifs: violet, grands et doux, moyennement juteux et la pulpe a des graines de taille moyenne. Alors qu'il est connu que le sélectionneur a distribué le matériel de plantation dans plusieurs états, il n'y a pas de relevés précis sur sa superficie (**Figure 1**).

Les autres variétés moins connues utiles pour la production de nopalito dans les zones tropicales semi-arides sont :

- '**Valtierrilla**', cultivée dans une petite zone du même nom située au centre du Mexique et ses alentours;

caractérisée par des cladodes densément épineux; préférée pour ses *nopalitos* tendres de types « baby » ou « cambray »; sensible aux dégâts du froid; elle se comporte bien en saumure.

- '**Blanco**' (*Nopalea cochenifera*) (**Figure 1**), cultivé à Valtierrilla et dans les états de Michoacán et Tamaulipas; sensible aux dommages du froid, mais se comporte mieux que 'Milpa Alta' quand il est saumuré - une caractéristique qui a fait vivre quelques industries familiales. A noter que quelques types locaux d'*O. robusta* sont aussi utilisés pour le saumurage à San Luis Potosí (**Figure 1**).
- '**Spineless 1308**' (*Nopalea cochenifera*), sélectionné par P. Felker des accessions collectées dans la région tropicale de Tamaulipas, Mexique, cultivé aux Etats-Unis d'Amérique, planté dans les régions côtières du Texas et de Tamaulipas

IMPORTANCE AGRICOLE DE LA CULTURE DU NOPALITO

La culture des *nopalitos* a atteint le statut formel de culture au Mexique dans les années 1980, quand les statistiques officielles ont signalé seulement deux zones principales de production, Milpa Alta et Tlalnepantla Morelos, toutes deux situées près de la ville de Mexico et couvrant environ 2 000 ha. La ville de Mexico et ses zones urbaines environnantes restent encore le plus grand marché pour tous les produits frais, incluant les *nopalitos*, atteignant presque 21 millions de personnes au dernier recensement (INEGI, 2010) (**Tableau 1**). Dès 1990, l'urbanisation et la démographie, combinées avec la nouvelle recherche sur les bénéfices santé de la consommation de nopalito, ont engendré une augmentation de la surface plantée; en 2010, elle a augmenté de 5 269 à 12 201 ha. La surface plantée se place actuellement en douzième position par rapport aux cultures de légumes: une indication de son importance (SIAP, 2015). De nos jours, les plantations de nopalitos légumes sont éparpillées à travers les zones centrales, ouest, centre-nord et nord-est du pays. Une proportion significative de la production est destinée au marché national (90%) ; cependant, la part pour l'exportation vers les Etats-Unis d'Amérique a augmenté régulièrement au cours de la dernière décennie, facilité par l'Accord bilatéral de Libre Echange Nord-Américain (ALENA) et par d'autres traités similaires.

La consommation par personne de *nopalitos* au Mexique en 2013 atteignait 6.4 kg, avec une demande concentrée dans les régions centrales et celles du centre nord, où le produit frais est disponible toute l'année. Il y a une décennie, la consommation de *nopalito* était au plus haut à Pâques; cependant, aujourd'hui, puisque plus d'informations sont disponibles sur leurs propriétés



fonctionnelles, la demande augmente et les *nopalitos* sont devenus une caractéristique commune dans la section légume des supermarchés.

Malgré la popularité grandissante des *nopalitos* au Mexique, la consommation n'a pas décollé dans les autres pays. Il y a un manque d'informations sur les modes de préparation et les effets bénéfiques attribués à sa consommation régulière et les produits cuisinés manquent d'attrait. Les consommateurs sont dissuadés par les épines et les glochides sur les cladodes et la libération de mucilage après la cuisson. Malgré la promotion de la consommation de *nopalito* en Afrique de l'Est et du Nord pour utiliser les plantes naturalisées, il y a eu peu d'impact, il en est de même en Inde et au Brésil.

Comme pour d'autres légumes, les *nopalitos* sont sujets à des réglementations sanitaires et des normes spécifiques sont disponibles pour *Opuntia* spp. et *Nopalea* spp. (NMX-FF-068-SC-FI-2006 pour le marché national ; CODEX STAN 185⁻¹ 993 pour l'exportation). Les deux posent les normes liées à la couleur des cladodes, l'absence de déformations, de dégâts de maladies et de ravageurs, et l'absence de contaminants. De plus, des campagnes officielles couvrent les bonnes pratiques agricoles en se concentrant sur l'importance d'offrir au consommateur un produit sain, sûr et indemne de contaminants. L'application de ces normes devrait aider à sécuriser et à augmenter la présence de *nopalitos* sur les marchés internationaux.

SYSTÈMES DE PRODUCTION DE NOPALITO

Plantes sauvages

La cueillette de *nopalitos* reste une activité traditionnelle dans les régions semi-arides du centre et du nord du Mexique, qui - en théorie - couvrent 3 millions d'ha (une surestimation, puisqu'elle inclut de vastes zones ayant seulement quelques plantes). Les *nopalitos* sont généralement disponibles à la fin de l'hiver ou au début du printemps, en fonction de la longueur et de l'intensité de la saison de gel. Les espèces les plus communes cueillies dans la nature sont: *O. streptacantha*, *O. robusta*, *O. leucotricha* et *O. xocoxotle*. Les produits sont

habituellement vendus sur les marchés locaux, sont caractérisés par une qualité variable, de petits volumes et une disponibilité irrégulière. La cueillette perd lentement son attrait puisque la densité de plantes sauvages se réduit, laissant la place à l'expansion des pâturages et au développement agricole et urbain. Les plantes sauvages sont aussi sujettes aux effets combinés des catastrophes naturelles: gels sévères, sécheresses et feux naturels, très probablement avivés par le changement climatique. La fructification alternée ou la croissance cyclique jouent aussi leur part dans le volume de *nopalitos* et de fruits collectés sur les plantes sauvages.

Vergers familiaux

Les vergers familiaux sont des éléments communs dans les zones rurales semi-arides, caractérisés par la diversité d'espèces de figuier de Barbarie, la gamme de leurs usages et la dominance de types inermes qui peuvent être entièrement utilisés, fournissant des cladodes tendres, des fruits et parfois des raquettes matures pour les animaux domestiques. Les vergers familiaux se trouvent principalement dans la région nord. Ils fonctionnent comme des réservoirs de gènes et un terrain de sélection pour des variétés locales, qui à leur tour évoluent en variétés commerciales qui soutiennent le marché commercial moderne de figues de Barbarie et de *nopalitos* (Pimienta Barrios, 1990).



Production de plein champ traditionnelle

Ce système de production a commencé, au cours des années 1950, à Milpa Alta - la plus vieille région de production de *nopalitos* au Mexique, située dans la banlieue de la ville de Mexico - Elle s'est étendue aux états voisins de Morelos, Puebla et Hidalgo. Le système se base sur des plantes buissonneuses (< 1.80 m), poussées de cladodes uniques plantés en rangs espacés de 0.80-1.50 m. Les pieds sont plantés à 50-75 cm les uns des autres, engendrant une densité de plantation de 10 000 à 40 000 plantes ha⁻¹ (**Figure 2**). Les cladodes de base ou cladodes pères sont dressés en deux ou trois branches ; ils remplissent complètement le rang, mais seulement partiellement les entre-rangs

TABLEAU 1 Surfaces cultivées de cactus au Mexique et utilisation des produits

Produit	Surface plantée (ha)	Irriguée	Sans irrigation
Fruit	55 254	720	54 534
Fourrage	16 266	42	16 266
Légume	12 039	3 204	8 835
Souches sauvages*	3 000 000 (1.5% du territoire national)		

Source: SIAP (2015) and *Soberon et al. (2001).

pour permettre le transit entre tous les rangs. La récolte peut commencer juste deux mois après la plantation, en cueillant les cladodes en excès une fois les branches primaires sont définies. Puisque c'est une production de plein champ, le système est très dépendant de l'humidité du sol et de la température de l'air. Les *nopalitos* tendres sont très sensibles aux dommages du gel, et même de courtes périodes peuvent endommager la couronne du cladode, affectant la forme finale, la productivité et l'apparence du cladode. Par conséquent, la saison de récolte est définie par la présence ou l'absence de gels; en d'autres termes, la longueur de la saison de récolte est déterminée par la durée de la période sans gel. Dans les hauts plateaux du Mexique, cette période dure, en fonction du microclimat local spécifique, de mi-mars à fin octobre ou novembre. L'émergence continue de nouveau cladodes tendres est aussi une réponse à la récolte en temps voulu, parce que la suppression continue ou la récolte des cladodes tendres stimule l'émission de nouveaux cladodes. Par contre, si les conditions de marché ne sont pas favorables, le report de la récolte retarde le nouveau bourgeonnement.

Mini-tunnels en plastique

Ce système représente les premières tentatives de contrôle des effets du gel sur la production de *nopalitos*. Il a été adopté pour la première fois au cours des années 1970-1980, et il est encore

d'usage dans les petits vergers familiaux à travers le pays. Il y a une large bande de plantation (120-150 cm), avec 3-4 rangs de cladodes; l'espacement des rangs est de 30-40 cm, la distance entre les plantes de 20-30 cm. Le nombre de rangs varie selon la largeur du tunnel. Avec les critères ci-dessus, une portion de 2 m d'une bande de plantation peut avoir 18 à 24 cladodes. La densité finale de plantation varie selon la largeur de la bande et le couloir de séparation, qui à son tour dépend de la disponibilité de la main d'œuvre et du transport. Dans les grandes plantations, l'enlèvement du produit récolté, l'apport d'engrais et de fumier et la pulvérisation sont réalisés avec un tracteur et une bande sans plantes est nécessaire tous les 2-3 bandes plantées. Les tunnels de plastique sont construits avec des tubes de métal arqués (calibre 3/8 [9.5 mm]) fixé au sol, couverts par une toile de polyéthylène transparent (calibre 600 mils) et renforcé avec une corde en polyéthylène posée en diagonale sur le tunnel pour sécuriser le plastique contre le vent. Les arceaux sont généralement inférieurs à 2 m, conçus pour couvrir une seule bande de *nopalitos*. La ventilation est passive, générée par le relevage manuel des plastiques aux heures les plus chaudes de la journée.

Ce type de structure fournit une protection contre les faibles gelées (dans la gamme de -1°C); sa fonction principale est de réduire les vents froids et augmenter la température pendant la journée (**Figure 2**).

Figure 2
Systèmes de production de nopalito (dans le sens horaire : plein champ à Tlalnepantla, Mor. Mexique ; mini-tunnels ; serres ; tunnels bas)



Il y a de nombreuses variations d'agencement de la plantation, différant en largeur de bande, positionnement des cladodes et hauteur de la couverture plastique. Diaz et Maya (2014) décrivent un système utile pour les régions tropicales :

La bande devrait être orientée N-S pour réduire la force du vent et maximiser l'exposition aux rayons du soleil, la dimension des bandes sera de 1.8 m de large et 45 m de long pour optimiser l'utilisation des rouleaux de plastique qui sont généralement des rouleaux de 100 m de long. Le tunnel peut être construit en utilisant des tiges de métal ondulées de 3/8", coupées en bouts de 4 m de long - suffisants pour construire un tunnel de 1.4 m de hauteur - formé en arches de 1.8 m de large à la base. Les arches seront insérées dans des pièces de tuyau de plastique blanc ou coloré (1/2 pouce d'épaisseur) qui vont empêcher le plastique de fondre au contact des tiges de métal à cause du soleil. La pointe de chaque tige doit être enterrée de 30 cm de profondeur pour donner de la force à la structure, et elles sont placées tous les 2m. La toile de plastique est placée par-dessus et le bord est fermement enterré dans le sol du côté est. Il est recommandé d'utiliser une toile de plastique transparent de 4 m de large et de calibre 600 mils, avec une protection UV, spéciale pour serres. L'autre bord est maintenu en place avec quelques sacs de toile remplis avec de la terre, pour qu'ils puissent être facilement enlevés pour ouvrir ce bord si la température atteint plus de 35°C. Enterrer un piquet en bois court à chaque extrémité du tunnel éloigné de 1.2 m du bout de la bande; ce piquet va ancrer sept fils de corde de polyéthylène. Puis les tendre et les attacher au-dessus de chaque arche, en les répartissant de manière égale au sommet et des deux côtés du tunnel, pour aider le plastique à garder sa forme semi-cylindrique.

Serres low-tech

Le Mexique, comme beaucoup d'autres pays subtropicaux, est en train de vivre une explosion de l'agriculture sous abris; du matériel de serres importé et national est facilement disponible pour la production de légumes. Les tendances du marché favorisant la production hors-saison et tout au long de l'année ont engendré une augmentation de la demande de produit, bénéficiant aux producteurs et aux consommateurs. Etant donné la bonne réponse du nopal à l'irrigation, aux températures élevées et aux engrais, la culture sous abris est une tendance dans les zones nouvelles et traditionnelles de culture. Plusieurs concepts ont été adaptés pour produire des *nopalitos*, utilisant la rusticité de la plante. Les serres pour la production de *nopalitos* sont habituellement simples, protégeant faiblement du gel mais maintenant une gamme de températures favorables (10-30°C). L'atténuation des températures élevées est réalisée grâce à des ouvertures gérées manuellement. Puisque la plante de nopal n'a pas besoin de support,

les éléments métalliques sont réduits au minimum: des poteaux 2 x 2 placés 2-3 m les uns des autres; des arches (généralement faites de métal galvanisé) soudées sur site et renforcées avec des verrous en métal galvanisé; les poteaux sont ancrés au sol avec du béton. La largeur du tunnel varie de 6 à 9 m, en fonction des moyens du producteur et la disposition de la plantation varie pour optimiser l'espace couvert (**Figure 2**).

Macrotunnels

Ces structures sont conçues pour fournir un abri et une protection contre le rayonnement élevé, les précipitations excessives, la grêle et les dégâts du vent, améliorant ainsi la qualité du produit. Elles ont été introduites au Mexique pour des cultures à forte valeur, telles que les plants de légumes, les fraises, les framboises, les myrtilles et les poivrons, mais ont été lentement adaptées à la culture de *nopalito* au nord du Mexique, spécialement dans les zones tropicales avec un faible risque de gel. Le macrotunnel typique n'a pas de murs; il est construit sur 2-3 barres d'acier ancrées dans le sol, avec des arches en acier et couvert avec du polyéthylène anti-UV. Ils font 4-5 m de large et 2-3 m de haut; ils sont relativement faciles à construire et ont un coût relativement faible comparé aux serres classiques. L'agencement de la plantation est conçu pour optimiser l'espace protégé disponible et il est similaire au système à larges bandes; l'irrigation est apportée par des lignes de gouteurs (**Figure 3**).

Nopalitos hydroponiques

Le système le plus avancé pour produire des *nopalitos* est celui des bâtiments hydroponiques, pour lesquels il y a un modèle expérimental conçu et promu par le Campus du Collège Supérieur de San Luis Potosí. Le système est basé sur une serre couverte de plastique avec un refroidissement passif standard; il utilise une subirrigation et inclut une couverture de sol sur les allées pour assurer une économie maximale d'eau, une utilisation optimale des engrais et un contrôle commode des adventices. Les plantes sont mises en place à une densité élevée et sont gardées buissonnantes pour réduire la promiscuité et améliorer l'interception de la lumière par la canopée de nopal (**Figure 4**).

PRATIQUES DE PRODUCTION

Nutrition de la culture

Le nopal est généralement considéré comme une culture rustique, capable de survivre dans des sols pauvres et des zones sèches. Cela est vrai; cependant, si la plante est soumise à des sols de bonne qualité, une



Figure 3

Serre low-tech pour la production de nopalito, San Luis de la Paz, Gto. Mexique (dans le sens horaire : vue d'ensemble ; toit ; fondation ; murs)

**Figure 4**

Production de nopalito sous tunnels (9.6 m de large x 4.3 m de haut) ; nopalitos plantés en planches larges (1.40 m et 1.4 m d'allée) ; unité hydroponique pour la production de nopalito/fourrage (CP, San Luis Potosí, Mexique)



fertilisation et une irrigation abondante, la productivité est significativement améliorée. Les effets bénéfiques de l'association de fumier et d'engrais de synthèse pour les figuiers de Barbarie dans des conditions d'agriculture pluviale sont rapportés par Mondragón Jacobo et Pimienta Barrios (1990). De meilleures réponses sont obtenues avec de l'irrigation et en utilisant d'autres sources organiques telles que le vermicompost, le fumier composté, le fumier solarisé et les produits mycorhiziens.

La productivité des *nopalitos* ou du nopal à fourrage peut être exprimée en kg de cladodes frais par plante; elle est fonction du génotype, de l'environnement et des pratiques de gestion de la culture, dont la fertilisation. Peu de choses sont connues sur les besoins en éléments minéraux du nopal ou les interactions synergiques et antagonistes entre les éléments minéraux pour tous les différents systèmes de production. Néanmoins, Blanco Macías *et al.*, (2006) rapportent une interaction positive entre Mg-Ca, Mg-K et K-P, en comparaison avec des interactions antagonistes significatives entre Ca-N et Mg-N. La gamme optimale de concentration pour les cinq éléments minéraux essentiels pour atteindre un objectif de rendement de 46.7 kg de matière fraîche (en considérant seulement les cladodes) sont : N = $1.29 \pm 0.47\%$, P = $0.35 \pm 0.08\%$, K = $4.24 \pm 0.88\%$, Ca = $4.96 \pm 1.73\%$, Mg = $1.61 \pm 0.27\%$.

Des informations précises sur la nutrition des *nopalitos* légumes sont aussi rapportées par Magallanes Quintanar *et al.*, (2004), Valdez Cepeda *et al.*, (2009) et Blanco Macías *et al.*, (2010), suite à plusieurs années d'expérimentation au champ. Selon la technique de la ligne de seuil de courbes, les besoins en éléments minéraux dépendent de la quantité d'éléments minéraux disponibles dans le sol, du rendement attendu et de la densité de plantation. De manière à obtenir 95% de rendement optimal (56-60 kg plante⁻¹), en supposant une teneur en matière sèche du figuier de Barbarie d'environ 5%, la plante doit absorber 23.7 g N, 7.06 g P, 112.5 g K, 95.36 g Ca et 41.7 g Mg. Pour une densité de plantation de 10 000 plantes ha⁻¹, le sol doit, par conséquent, fournir 24 kg N, 71 kg P, 1124 kg K, 954 kg Ca et 417 kg Mg ha⁻¹, pour un rendement théorique de 564 tonnes ha⁻¹ de matière fraîche ou 28 tonnes ha⁻¹ de matière sèche. Valdez Cepeda *et al.* (2009) mettent en garde contre la réponse élevée des plantes de nopal à la fertilisation azotée et la possibilité d'accumulation jusqu'à des niveaux toxiques, puisque la concentration de nitrate peut augmenter dans les cladodes - potentiellement dangereux s'ils sont utilisés en fourrage ou en légumes.

L'addition de fumier (principalement frais ou partiellement composté) est une pratique traditionnelle en production de *nopalitos*, parce que la forte réponse de la plante de nopal est bien connue parmi les producteurs mexicains - démontrée par des quantités records de 800 tonnes ha⁻¹ de fumier frais de vache, enregistrés

dans des vergers de *nopalitos* de Milpa Alta (Fernández *et al.*, 1990; Aguilar, 2007; Flores, 2013). Des quantités aussi élevées sont justifiées, en considérant le long effet résiduel et l'amélioration des propriétés du sol; cependant, ils peuvent aussi engendrer des brûlures si le fumier est apporté au cours des mois les plus chauds de l'année. Les expérimentations au champ conduites par Zuñiga Tarango *et al.* (2009) ont démontré que 100 tonnes ha⁻¹ de fumier frais sont suffisantes pour obtenir des rendements de *nopalitos* rentables.

L'apport de fumier bénéficie d'une attention croissante, à cause de l'intérêt croissant pour les produits issus de l'agriculture biologique sur les marchés modernes et l'augmentation continue du prix des engrais artificiels. Les expériences directes des producteurs et les résultats d'expérimentations formelles insistent sur l'intérêt de l'irrigation et de la fertilisation dans des proportions adéquates pour obtenir des rendements élevés (Flores, 2013). Les sources et les quantités appliquées dépendent de la disponibilité. La source la plus commune est le fumier de vache frais obtenu des producteurs laitiers, suivi par le fumier de chèvres et celui de poules.

A cause de l'augmentation des coûts de transport, il y a un intérêt croissant pour le compost. Dans une évaluation de la production de *nopalito* à Milpa Alta au Mexique, Aguilar (2007) rapporte que des rendements similaires (45-60 tonnes ha⁻¹ an⁻¹) ont été obtenus avec 3.3 tonnes ha⁻¹ de fumier de bovin laitier vermicomposté à la place de 800 tonnes ha⁻¹ de fumier frais. Dans cette étude, le coût du fumier fraîchement composté était seulement 22% du taux habituel de fumier frais. Étant donné la nature pérenne de la plante de nopal, l'application de fumier peut être répétée tous les 2-3 ans selon la quantité initiale; le choix d'appliquer en une seule dose ou en deux fractions dépend du coût local du travail manuel.

La fertilisation, l'irrigation et la taille sont corrélées à l'émergence rapide de nouveaux bourgeons végétatifs. Une gestion consciencieuse est importante pour réduire les dégâts du gel, optimiser l'eau des pluies et, le plus important, profiter des fenêtres de marchés spécifiques. La saison pluvieuse au centre du Mexique présente quelques variations, mais, généralement elle suit une allure bimodale, commençant fin juin avec une faible dépression en août et augmentant de nouveau en septembre. Les risques de gels augmentent de la fin d'octobre à mars - quand la demande de *nopalitos* est à son plus haut niveau. Dans ces conditions, si l'irrigation est disponible, le fumier et les engrais devraient être appliqués à la fin de la saison des pluies et tôt au printemps. Dans le cas d'une exploitation entièrement en agriculture pluviale, les engrais et le fumier peuvent être incorporés avant la fin de la saison des pluies. La fertilisation en excès peut causer des brûlures sur les cladodes et une oxydation rapide des *nopalitos*.



Irrigation de la culture

L'irrigation par goutteurs est une méthode efficace pour les vergers de *nopalitos*. Les avantages de l'irrigation par goutteurs incluent (Vázquez-Alvarado *et al.*, 2009) :

- La capacité d'apporter des engrais solubles ;
- Des économies d'engrais de 30 à 50% (en comparaison avec de l'irrigation par asperseurs ou par sillons) ;
- Une réduction de la compétition des adventices ;
- L'amélioration de la préservation des sols et de l'eau.

Orona Castillo *et al.* (2003) présentent des données spécifiques sur l'utilisation de l'eau, à la suite d'une étude sur l'irrigation superficielle et sous-superficielle et trois niveaux d'humidité du sol - 30, 45 et 60% d'évaporation journalière (tank d'évaporation de type A) - pour plusieurs espèces d'*Opuntia*. Ils indiquent un rendement total de 100.4 tonnes ha⁻¹ et 18.8 kg de *nopalitos* par m³ d'eau. L'utilisation totale d'eau est de 5340 m³ ha⁻¹, c'est-à-dire moins que ce qui est nécessaire pour produire du maïs, des haricots secs et des fourrages (dont les besoins sont de 5 500 à 18 000 m³). Selon ces données, les auteurs recommandent pour les variétés d'*O. ficus-indica* : une irrigation à 45% de l'évaporation journalière; et un apport annuel de 161, 60.7 et 914 kg ha⁻¹ de N, P et K, respectivement.

Flores (2013) - sur la base de données obtenues dans un verger planté en sillons, utilisant un système d'irrigation par goutteurs - estime la consommation d'eau à 391.9 mm par an. Les plantes devraient être arrosées quand la tension hydraulique du sol atteint 35 cb, associée à une consommation journalière de 1.1 mm, c'est-à-dire 2 321 m³ ha⁻¹ d'eau an⁻¹. La productivité de l'eau est estimée à 111 kg m⁻³ pour des plantes d'*O. ficus-indica* fertilisées avec du fumier de vaches laitières et de l'engrais solide triple 17, ceci est significativement plus élevé que la productivité du témoin (76 kg m⁻³). Le calendrier d'irrigation recommandé est de quatre irrigations quand le tensiomètre atteint 35 et 2 quand il atteint 70. L'eau doit varier en fonction du lieu : Nobel (1998) estime à 3.27 mm jour⁻¹ pour la Californie, alors que Fierro *et al.* (2003) ont rapporté 1.65 mm jour⁻¹ à Milpa Alta au Mexique. Enfin, pour améliorer l'efficacité de l'irrigation, il est nécessaire de considérer la distribution des précipitations et éviter l'excès d'eau, en utilisant une seule ligne de goutteurs pour deux rangs consécutifs.

Taille de formation

La taille de formation de la plante pour la production de *nopalitos* implique son façonnage en une forme régulière, en évitant la production de branches vers les allées et en maintenant la plante à une hauteur inférieure à 1.8 m (dans les systèmes de production en sillon ou en

haie) ou en dessous du quatrième étage (pour les plantations en mini-tunnel). La taille de formation élimine l'excès de cladodes produites sur le deuxième étage. Les plantes de *nopalito* sont généralement laissées avec 2-3 branches principales, configurées en « oreilles de lapin » ou en « éventail »; le reste est soit récolté soit jeté. En pratique, la taille est combinée avec la récolte; cependant, quand la demande du marché ralentit, la suppression des cladodes matures est programmée en fonction des dates attendues de reprise du marché.

Gestion des déchets de taille

Un exemple remarquable de l'utilisation des déchets de taille est l'incorporation des cladodes frais tranchés dans le champ dans lequel ils ont été collectés. Pour cette opération, les producteurs de *nopalito* utilisent traditionnellement des machettes et des couteaux. Cependant, des petites machines spécialisées ont été récemment importées du Brésil, conçues à l'origine pour préparer le fourrage de nopal, et des machines de conception mexicaine sont aussi disponibles. Cette pratique augmente l'humidité et le taux de matière organique du sol et réduit temporairement la compétition des adventices.

Ravageurs et maladies

La plupart des ravageurs présents dans les vergers de cactus fruitiers se retrouvent aussi dans les vergers de *nopalito*; cependant, leur incidence et les dommages sont limités à cause de la taille continue. Le ravageur le plus préoccupant pour la production de *nopalito* est la cochenille; les ravageurs lépidoptères les plus importants sont les vers zèbres (*Olycella nephelepsa*), le ver blanc (*Megastes cyclades*) et la mineuse des cladodes (*Metapleura potosi*). De la même manière, le charançon du cactus (*metamasius spinolae*), le charançon de la criblure (*Gerstaeckeria* spp.) et le charançon des aréoles (*Cylindrocopturus biradiatus*) sont rencontrés. Les scarabées (*Phyllophaga* sp.) sont importants pour les vergers de *nopalito* plantés sur des sols volcaniques légers. Pour une description détaillée de ces ravageurs, voir Chapitre 11.

Récolter les *nopalitos*

Les cladodes devraient être récoltés 30 à 60 jours après le bourgeonnement, quand ils pèsent 80-120 g et font 15-20 cm de long (Flores Valdez, 1995). Les *nopalitos* tendres portent des épines et des glochides, et par conséquent des gants en latex et des couteaux sont utilisés pendant la récolte. Les cladodes tendres sont soigneusement enlevés en insérant le couteau dans les jointures entre cladodes - une opération nécessitant des compétences pour maintenir le produit intact. Ils sont



déposés dans des paniers ou des caisses en plastique (**Figure 5**), et triés en fonction des standards du marché : petits ou baby, moyens et grands. En fonction du marché de destination, le producteur peut emballer les *nopalitos* en bottes cylindriques ou rectangulaires, en les enroulant dans du papier marron ou un film de polyéthylène.

TECHNIQUES DE BASES POUR LA PRÉPARATION

Nettoyage des *nopalitos*

La méthode la plus commune appliquée aux *nopalitos* est toujours le nettoyage manuel, en utilisant seulement un couteau aiguisé et des gants de néoprène. D'autres outils ont été testés : des couteaux de type lame de rasoir, des cuillères creuses et aiguisées, des épiliches légumes etc., mais toujours avec moins de succès. Une machine laser a été une fois proposée, mais à cause de son coût élevé et de sa faible efficacité, elle n'a jamais passé la phase de prototype. Plus récemment, une machine de nettoyage basée sur des couteaux rotatifs et construite avec de l'acier inoxydable a été introduite pour nettoyer des grands volumes pour l'industrie du *nopalito* de conserve. Développée par des inventeurs mexicains, elle est promue par la marque Nopalli (<http://www.agrocentro.org/#!services/c21r>) et peut être ajustée pour différentes tailles et formes de *nopalitos*. La machine peut traiter jusqu'à 40 raquettes par minute avec un gaspillage estimé à moins de 15%. Le même fabricant a produit une deuxième machine conçue pour découper des *nopalitos* propres en différentes formes : dés ou lanières (**Figure 6**).

La suppression totale des épines et des glochides à la main requiert des compétences et de la pratique, une démonstration peut être visionnée sur une vidéo publique (disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=XfekDxpqB-l>). Le nettoyage des *no-*

palitos sur le lieu de vente offre au consommateur une preuve de sa fraîcheur. Cette initiative a été testée avec succès dans de nombreux supermarchés mexicains, où le produit fraîchement nettoyé est proposé découpé en dés ou en filets en fonction du choix du consommateur.

Réduire la présence de mucilage

Le mucilage est un trait commun de tous les *Opuntia*. Le mucilage est libéré en réponse à une blessure et la quantité libérée dépend de la variété, de l'âge du cladode et du stade de déshydratation. Le mucilage est aussi libéré pendant la cuisson, qui généralement implique une ébullition. Néanmoins, le mucilage ne peut pas être complètement enlevé des *nopalitos* quelle que soit la méthode de préparation adoptée. Différentes méthodes ont évolué pour réduire ou masquer sa présence dans la préparation finale :

- L'ajout de feuilles d'origan séchées, de feuilles de laurier, de tiges d'oignon coupées, d'enveloppes de tomate, de grains de sel de mer, de bicarbonate de sodium, de jus de citron, d'enveloppes de maïs ou de gousses d'ail, en fonction de la recette de *nopalito* utilisée.
- Interruption de l'ébullition pour plonger les *nopalitos* dans de l'eau froide ou fraîche.
- L'ajout de quelques pièces de cuivre ou d'argent pendant l'ébullition – bien que cette méthode particulière soit la moins recommandable étant donné le risque élevé de contamination.
- Blanchiment avec du sel de table et de l'origan pendant 7 minutes (Pensaben *et al.*, 1995).



Figure 5
Emballages standards en polyéthylène de 20 à 30 kg de *nopalitos* et les balles cylindriques traditionnelles contenant jusqu'à 300 kg ou jusqu'à 4 500 cladodes

Les méthodes de cuisson les plus agressives ont un impact négatif plus important sur les teneurs en vitamines et en minéraux, réduisant les propriétés fonctionnelles et les effets bénéfiques de la consommation de *nopalito*. La méthode au sel et à l'origan (Pensaben *et al.*, 1995) réduit la présence de mucilage sans affecter la couleur verte typique des *nopalitos*.

Le blanchiment et le saumurage sont les traitements standards pour les grands volumes de *nopalitos* utilisés dans l'industrie de restauration au Mexique et ils ont menés à la popularisation des *nopalitos* dans les années 1990.

Acidité des cladodes

Les *nopalitos* sont caractérisés par leur acidité, qui est due à l'assimilation photosynthétique CAM des *Opuntia* et elle peut en affecter l'acceptation par les nouveaux consommateurs. L'acidité varie

significativement (0.1 à 0.5% d'acidité titrable), en fonction de l'heure de la journée. L'acidité diminue pendant la journée et augmente la nuit, quel que soit le moment de la récolte (Corrales García, 2010). L'acidité de plusieurs variétés de *nopalitos* diminuait pendant la journée, en relation avec l'exposition à la lumière - une réponse typique des plantes CAM (Flores Hernández *et al.*, 2004). Même quand ils sont détachés des plantes, les variations sont visibles, puisque le cladode reste vivant et photosynthétiquement actif. Cantwell *et al.* (1992) rapportent des valeurs de pH de 0.94% le matin, diminuant à 0.47% l'après-midi ; Pimentel González (2013) recommande donc de récolter les *nopalitos* deux heures après le lever du soleil. Dans tous les cas, la récolte a typiquement lieu tôt le matin quand l'humidité est la plus élevée et que l'exposition des ouvriers aux glochides est réduite, rendant ce moment idéal pour travailler dans les champs.

L'acidité semble dépendre de la variété, selon Aguilar Sánchez *et al.* (2007) qui ont étudié 21 cultivars utilisés comme légumes: 'Jalpa' et 'Morado Italiano' autour de 0.43%; 'Milpa Alta' 0.68%; 'Oreja de Elefante', un cultivar à fourrage, 0.69%. La même étude a révélé que 'Jade' et 'Negrito' présente une faible oxydation, un autre caractère important pour la transformation agroindustrielle.

L'acidité peut être modifiée par la température pendant le stockage. Un stockage au frais (5°C) maintient ou augmente légèrement l'acidité, alors qu'un stockage à température ambiante (20°C) diminue l'acidité. Ces fluctuations modifient la saveur des *nopalitos*, et selon Corrales García *et al.* (2004), les moments de la transformation et de la consommation sont plus importants que le moment de la récolte.

Figure 6
Machines pour nettoyer les *nopalitos* et les couper en dés, Mad Industrias, Monterrey N. L., Mexique



Elevage des cochenilles

Liberato Portillo et Ana Lilia Viguera
Département de Botanique et de Zoologie,
Centre Universitaire pour les Sciences Biologiques et Agricoles,
Université de Guadalajara, Jalisco, Mexique



INTRODUCTION

Les cochenilles (*Dactylopius* spp.) sont un groupe américain d'insectes hémiptères (Spodek *et al.*, 2014) prospérant sur les plantes d'*Opuntia*. La cochenille est importante pour le genre humain pour 4 raisons :

1. Les insectes sont source d'acide carminique, un pigment (**Figure 1**) principalement extrait de *Dactylopius coccus*, utilisé comme colorant alimentaire, en cosmétique, dans les médicaments, pour les tissus et dans beaucoup d'autres produits (Cañamares *et al.*, 2006 ; Chávez Moreno *et al.*, 2009).
2. Certaines espèces de *Dactylopius* ont été utilisées pour le contrôle biologique contre les cactus invasifs (Githure *et al.*, 1999; Volchansky *et al.*, 1999; De Felice, 2004).
3. *Dactylopius* spp. peut devenir invasive pour les espèces d'*Opuntia* là où elle n'est pas indigène (Van Dam et May, 2012).
4. Des recherches sont en cours sur les propriétés antioxydantes et antimicrobiennes de l'acide carminique, pour en comprendre les applications potentielles en immunologie, pour le traitement

des eaux usées et les cellules solaires (González *et al.*, 2009; García Gil *et al.*, 2007; Bae et Huh, 2006; El Moselhy *et al.*, 2011).

Pendant longtemps, il y a eu une controverse sur l'origine de la cochenille (*D. coccus*), et certains auteurs citent l'Amérique du Sud (Rodríguez et Niemeyer, 2000; Rodríguez *et al.*, 2001). Cependant, la recherche a aujourd'hui admet qu'elle provient de l'Amérique du Nord où on trouve ses milieux écologiques d'origine et où elle a co-évolué avec les facteurs abiotiques (**Tableau 1**) et biotiques, principalement les plantes hôtes (**Tableau 2**) et les ennemis naturels (**Tableau 3**) (Griffith, 2004; Portillo, 2005; Novoa, 2006). En se basant sur les données de l'ADNmt et la modélisation des niches climatiques (Van Dam *et al.*, 2015), son origine a été précisée être au Mexique.

La cochenille a été pendant des siècles l'un des plus importants pigments et elle est toujours utilisée aujourd'hui (Serrano *et al.*, 2011, 2013). On l'a utilisée pour la première fois chez les anciennes civilisations d'Amérique (Donkin, 1977; Piña, 1977) et, quand les Européens sont arrivés en Amérique,

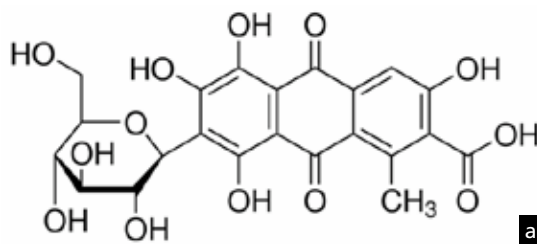


Figure 1
Acide carminique
b, c, d) diversité de
déprédateurs

son utilisation et son élevage se sont répandus. Les premiers colorants artificiels ont été synthétisés au dix-neuvième siècle et le marché de la cochenille a décliné et a presque disparu. Cependant, aujourd'hui, l'utilisation de sources naturelles de pigments est de nouveau en augmentation grâce à leurs bénéfices pour la santé ; et la production de cochenille est en train d'être rétablie avec une diversité de techniques d'élevage dans plusieurs zones tropicales et subtropicales du monde.

Ce chapitre décrit les diverses méthodes de l'élevage de la cochenille et souligne les pratiques de récolte et de gestion post-récolte, avec une attention portée sur sa biologie et son écologie dans et hors de la zone d'origine.

BIOLOGIE

Dactylopius est le seul genre de la famille des Dactylopiidae (Hemiptera : Coccoidea). Les 11 espèces sont toutes parasites des cactus (De Lotto, 1974 ; Spodek *et al.*, 2014) et se répartissent selon une distribution disjointe (Van Dam et May, 2012). Elles sont originaires de :

- Amérique du Sud : *D. austrinus* De Lotto, *D. confertus* De Lotto, *D. zimmermanni* De Lotto, *D. salmianus* De Lotto et *D. ceylonicus* Green ;
- Amérique du Nord : *D. bassi* (Tozzetti), *D. coccus* Costa, *D. confusus* (Cockerell), *D. gracilipilus* Van Dam et May, *D. opuntiae* (Cockerell) et *D. tomentosus* Lamarck.

L'espèce la plus utilisée à des fins commerciales - pour sa forte teneur en pigment (> 20% d'acide carminique) - est l'espèce domestiquée *D. coccus* (*belle cochenille*). Jadis, elle était connue comme *nocheztli*, un mot Nahuatl signifiant « sang de cactus », en référence à l'insecte et à la teinture qu'il produit (Wright, 1963). En 1758, Linnaeus l'appelait *Coccus cacti* ; en 1835, Costa la classifia en tant que *Dactylopius coccus* (Piña, 1977).

Dimorphisme sexuel

Les *Dactylopius* males ont des ailes au stade adulte ; ils sont plus petits que les femelles et très mobiles. Les femelles font environ 6.24 mm, sans ailes, sédentaires, de forme ovale et couverte de cire poudreuse. Montiel (1995) déclare que : puisque les males subissent une métamorphose complète, leurs stades immatures doivent être dénommés larves. Puisque les caractéristiques du dimorphisme n'apparaissent pas sur les premiers stades immatures et que ce sont les corps des femelles qui sont utilisés pour obtenir le pigment, par souci de simplicité, tous les stades immatures seront appelés nymphes.

Cycle de vie

Les femelles et les males passent par le stade œuf (**Figure 2a**) et deux stades immatures. Le cycle biologique de l'œuf à l'adulte dure de 90 à 128 jours, en fonction de la température et d'autres facteurs (Marin et Cisneros, 1977).

- **Nymphe I.** A ce stade immature la femelle a, deux sous-stades : l'un mobile et l'autre fixe. Le premier sous-stade est aussi connu comme baladeur (**Figure 2b**), caractérisé par le mouvement et l'absence de cire blanche ; en moins de 24 heures, elle doit trouver une place sur le figuier de Barbarie pour y insérer ses pièces buccales. Une fois la nymphe fixée, elle passe au second sous-stade en secrétant de grands filaments de cire sur son corps (**Figure 2c**) ; en quelques jours, les filaments disparaissent et cèdent la place à la cire poudreuse.
- **Nymphe II.** Après une première mue (**Figure 2d**), la nymphe immature (**Figure 2e**) devient rouge brillant et en quelques heures elle commence à être recouverte de cire. Les stades nymphe I et II ne présentent pas de différences apparentes entre les mâles et les femelles.
- **Femelle adulte.** La cochenille femelle subit une



Figure 1
Deux formes de
coccidoculture :
e) sous abris
f) en plein air

autre mue (**Figure 2f**), synchronisée avec celle du mâle adulte pour la copulation. Pendant ce stade, la femelle augmente en taille (**Figure 2g**). Chaque femelle produit habituellement 420 œufs mais environ 10% des femelles sont infertiles (Vargas et Flores, 1986), ce qui réduit la production de nouvelles larves baladeuses.

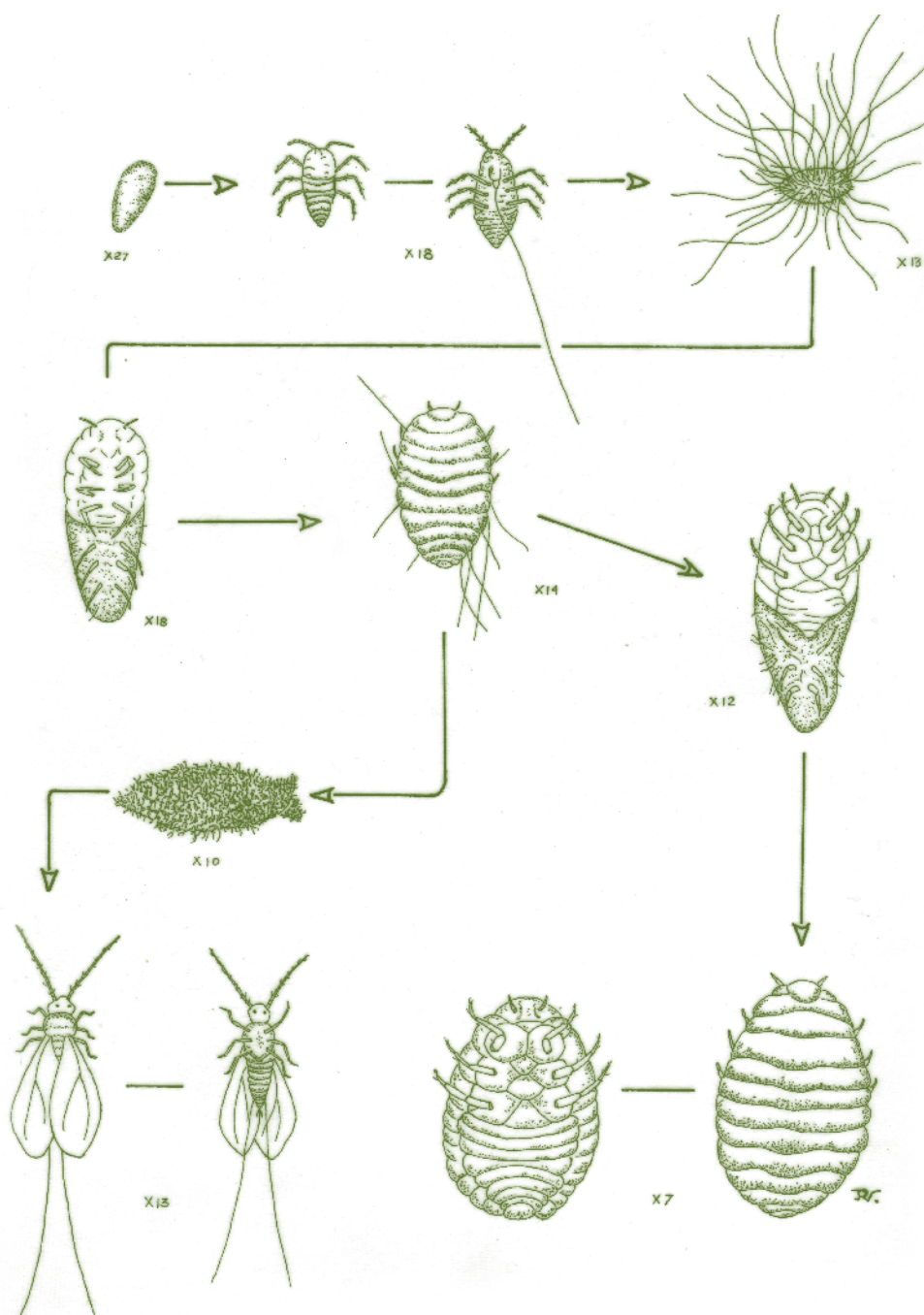
- **Mâle adulte.** La cochenille mâle commence par élaborer un cocon (**Figure 2h**) pour émerger ensuite en mâle adulte (**Figure 2i**). Le mâle présente deux paires d'ailes, deux cerques, des pièces buccales non fonctionnelles et il est mobile pour rechercher les femelles pour l'accouplement.

L'ÉLEVAGE DE COCHENILLES

Facteurs biotiques et abiotiques

La coccidoculture ou l'élevage de cochenille est une activité qui peut être pratiquée dans de nombreux lieux dans les régions tropicales et subtropicales, mais elle est conditionnée par les facteurs biotiques et abiotiques ; et il est par conséquent vital de comprendre quels sont les facteurs présents dans une zone particulière. Pendant la saison des pluies, il est recommandé de procéder à la multiplication des cochenilles sur des cladodes isolés et sous protection. En effet, dans presque

Figure 2:
Le cycle biologique
de l'œuf à l'adulte



tout le Mexique la coccidoculture se pratique de cette façon à cause des :

- Facteurs abiotiques - conditions défavorables en plein air (**Tableau 1**) ;

- Facteurs biotiques - essentiellement les ennemis naturels (**Tableau 3**), avec une grande diversité de déprédateurs au Mexique (**Tableau 1b, c et d**).

TABLEAU 1 Facteurs abiotiques limitant l'élevage de cochenille

Facteur	Effet principal	Source
Température	Altération de la longueur du cycle biologique	Méndez, 1992
	Déshydratation des nymphes	Flores, 1995
Pluie	Destruction de 100% de la population de cochenilles	Flores, 1995
	Asphyxie des cochenilles	Alzate and Ramírez, 1777
	Fixation et développement des nymphes entravés	Flores, 1995
Vent	Fixation limitée des cochenilles	Aquino, 1992
	Dispersion accrue et déplacement des nymphes	Flores, 1995
Lumière	Mouvement des larves baladeuses modifié	Flores, 1995
	Croissance et développement des cochenilles rendu possible	Aquino, 1992
Grêle	Cochenilles jetées au sol	Alzate and Ramírez, 1777
Gel	Élimination de plus de 50% des cochenilles	Alzate and Ramírez, 1777

L'élevage des cochenilles au Mexique a été signalé sur plusieurs espèces d'*Opuntia* (**Tableau 2**) ; les cultivars les plus importants pour la production commerciale sont les inermes 'Atlixco', 'Chicomostoc' et 'Milpa Alta', qui appartiennent tous au groupe *O. ficus-indica*.

TABLEAU 2 Espèces d'*Opuntia* signalées comme hôtes de *Dactylopius coccus* au Mexique

Espèce hôte	Source
<i>Opuntia amyclaea</i> Tenore	Vigueras and Portillo, 2014
<i>O. atropes</i> Rose	Rodríguez and Portillo, 1989
<i>O. cochenillifera</i> (L.) Salm-Dyck ^a	Piña, 1981
<i>O. crassa</i> Haworth	Vigueras and Portillo, 2014
<i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller	Piña, 1981
<i>O. fuliginosa</i> Griffiths	Portillo and Vigueras, 2003
<i>O. incarnadilla</i> Griffiths	Vigueras and Portillo, 2014
<i>O. jaliscana</i> Bravo	Portillo and Vigueras, 2003
<i>O. megacantha</i> Salm-Dyck	Piña, 1981
<i>O. pilifera</i> Weber	Portillo and Vigueras, 2003
<i>O. sarca</i> Griff. ex Scheinv.	Portillo and Vigueras, 2003
<i>O. streptacantha</i> Lem.	Piña, 1981
<i>O. tomentosa</i> Salm-Dyck	Piña, 1981
<i>O. undulata</i> Griffiths	Portillo and Vigueras, 2003

^a Cette espèce appartient au sous-genre *Nopalea*.

TABLEAU 3 Prédateurs de *Dactylopius coccus* que Costa a enregistré au Mexique

Espèce	Ordre et famille
<i>Laetilia coccidivora</i> Comstock	(Lepidoptera: Pyralidae)
<i>Eosalpingogaster cochenillivora</i> Guerin-Meneville	Diptera: Syrphidae
<i>Symphorobius amicus</i> Fitch	Neuroptera: Hemerobidae
<i>Hyperaspis trifurcata</i> Schaeffer	Coleoptera: Coccinellidae
<i>Chilocorus cacti</i> Lineo	Coleoptera: Coccinellidae

Source: Modifié de Vigueras and Portillo (2014).

Plantations de figuier de Barbarie pour l'élevage de cochenilles

Les plantations commerciales de figuier de Barbarie utilisent toujours des cultivars inermes d'*Opuntia ficus-indica* pour l'élevage de cochenilles, que ce soit en plein air ou sous abris. Les cultivars avec des fruits jaunes sont préférés, mais les cultivars blancs, rouges et violets peuvent aussi être utilisés. Les plantations ont une densité moyenne de 20 000 plantes ha⁻¹ mais le nombre peut varier en fonction de la qualité du sol (bon drainage), de l'altitude (800-2 300 m au-dessus du niveau de la mer), de la température (13-27°C) et de la disponibilité de l'eau (Salas, 2016). Les plantes reçoivent environ 30 tonnes an⁻¹ de fumier (vache, chèvre ou même poule) et une fertilisation additionnelle si besoin (N100-P50-K10).

Méthodes d'élevage des cochenilles



Il y a deux formes de coccidoculture : sous abris et en plein air (**Figure 1e et f**). Le choix de la méthode d'élevage dépend largement des conditions climatiques locales. Les structures pour la production de cochenille sous abris sont traditionnellement faites de bois, d'écrans d'ombrage, de feuilles de palmier, de plastique (transparent ou noir) et d'autres matériaux (Santibáñez, 1990 ; Méndez, 2013) ; cependant ces dernières années, la production intensive a utilisé de grandes serres (Escalante, 2013). Les principales méthodes sont décrites ci-dessous :

- **Microtunnel.** Les structures (hauteur approximative : 1 m) sont couvertes de plastique polyéthylène de serre ou de toile d'ombrage (1 mm d'épaisseur) (**Figure 3a**) pour protéger les plantes hôtes infestées de 2-3 ans ou les cladodes d'un an plantées individuelles (Vigueras et Portillo, 2014). Cette méthode est utile dans les régions de fréquentes fortes pluies ou d'hiver froid (minimum 0-10°C).
- **Tapesco.** Les abris ont un toit fait de roseaux, bois, rondins, tissu d'ombrage, palmes tissées ou plastique (Rodríguez et Portillo, 1989; Santibáñez, 1990). Ces abris sont utilisés pour suspendre de simples cladodes matures pour un petit élevage de cochenilles ou pour multiplier une colonie particulière de cochenilles tout en la protégeant des facteurs indésirables.
- **Production intensive.** Ce système (proposé par l'entreprise Campo Carmín) a été mis en œuvre pour la première fois en 2002. Des serres sont construites en utilisant des modules. Elles couvrent 1 356 m² et ont une capacité minimale de 432 000 cladodes inermes suspendues (Escalante, 2013). Cette méthode est actuellement la plus commune au Mexique (**Figure 1e**).
- **Irrigation.** Des cladodes simples sont implantés dans des systèmes hydroponiques au Pérou et au Mexique, utilisant des formulations de macro- et micronutriments pour favoriser la croissance des plantes hôtes

et de la cochenilles (Vigueras *et al.*, 1993). Cette méthode est commune sur la côte sud du Pérou (**Figure 1f**), où des plantations à haute densité (environ 9000 plantes ha⁻¹ ou plus) avec un système de fertigation sont infestées en plein air (Flores, 1995).

Méthodes d'infestation

Indépendamment de la méthode d'élevage de cochenilles sélectionnée, l'infestation est nécessaire pour obtenir une récolte. Les méthodes d'infestation requièrent une sélection soigneuse. Que ce soit pour infester une plante entière ou des cladodes matures individuels (Llana et Campos, 1999), il est fortement recommandé d'utiliser différentes boîtes appelées « nids » pour soutenir les femelles adultes en période d'oviposition (OP). De nouvelles méthodes d'infestation sont fréquemment introduites dans les plantations commerciales en plein air pour faciliter l'infestation et réduire le travail :

- **Oaxacan.** Des cylindres faits de palmes tressées (longueur 10 cm, diamètre 2 cm) portant des femelles en OP sont accrochés par les épines sur la plante hôte pendant une durée inférieure ou égale à 20 jours pour l'infestation. Les boîtes peuvent être transférées sur d'autres zones de la plante pour de meilleurs résultats., Le même concept est appliqué, En Bolivie, en utilisant des tiges vides de cannes à sucre avec beaucoup de petits trous (Tukuyupaj, 1993), et récemment au Pérou en utilisant des morceaux de tuyaux en plastique.
- **Péruvienne.** Les femelles adultes en OP sont introduites dans des petits sacs de tulle (10 x 10 cm), suspendus aux épines de la plante hôte jusqu'à ce que l'infestation soit observée (Quispe, 1983).
- **Ricci.** Une petite incision triangulaire (2 x 2 x 2 cm de côté, profondeur de 0.5 cm) est faite au centre d'un cladode, qui sèche et sert de support pour les femelles adultes en OP pour faciliter l'infestation (Portillo *et al.*, 1992).
- **Cladode infesté.** Des cladodes infestés avec des femelles adultes en OP sont placés à la base ou entre deux cladodes des plantes hôtes pour faciliter l'infestation (Tukuyupaj, 1993).
- **Tissu en coton.** Des petites pièces de tissu en coton sont placées sur des femelles adultes en OP, permettant aux larves baladeuses de s'y installer ; les pièces de tissu sont ensuite déposées sur les plantes hôtes destinées à être infestées (Quispe, 1983).
- **Gravité.** Puisque les femelles adultes commencent l'OP sur les cladodes en suspension, les larves baladeuses tombent par la force de la gravité sur de nouveaux cladodes placés en bas et non encore infestés. Cette méthode est adoptée au Mexique dans les nouvelles serres utilisées pour la production intensive des cochenilles (Escalante, 2013). Gareca (1993) a aussi décrit un système basé sur la gravité : un plateau

en mailles avec des femelles adultes en OP est placé au-dessus des plantes et des mouvements horizontaux réalisés deux fois par jour font tomber les larves baladeuses en bas pour infester les cladodes de la base.

- **Boîte en papier.** La méthode la plus simple : n'importe quel bout de papier à jeter est utilisé pour fabriquer une petite boîte (longueur 8 cm) avec des femelles adultes en OP à l'intérieur (Téllez, 1911) ; elle est attachée par des épines à la plante hôte permettant ainsi l'infestation (Figure 3b).

Récolte

La récolte est un processus délicat qui implique la séparation des insectes femelles de la plante hôte quand elles sont sur le point de commencer l'oviposition, en prenant soin d'éviter de les blesser. Il y a plusieurs méthodes pour récolter les cochenilles, en fonction de la méthode d'élevage (plein air ou sous abris) et de la plante hôte (sans ou avec épines).

En plein air

Dans la région Andine du Pérou et de la Bolivie, il y a beaucoup d'instruments faits de bâtons (longueur 0.60-1.50 m) munis au bout de cuillères, de brosses ou de bandes de métal pour recueillir les cochenilles (Figure 3c). Les cuillères et brosses sont utilisées sur les plantes inermes et les bandes de métal sur les plantes épineuses. Sur la côte sud du Pérou et au Chili, la cochenille est récoltée sur les plantes inermes en utilisant des brosses sans bâton. Au Chili et en Afrique du Sud, une autre méthode avec de l'air comprimé a été utilisée pour récolter les cochenilles sur les cladodes épineux (Brutsch et Zimmermann, 1993). Dans les Iles Canaries, la cochenille est récoltée en Novembre, 3 mois après l'infestation, en utilisant un instrument, ressemblant à une grande cuillère, appelé « *milana* ».

Pendant la récolte, les insectes collectés tombent dans des sacs faits de coton et sont plus tard étalés sur des plateaux en bois, en métal ou en argile, tout en prenant soin d'éviter l'agglutination qui pourrait écraser les insectes.



Figure 3

- a) Microtunnels
 b) Méthode d'infestation avec des boîtes de papier
 c) Utilisation d'instruments faits de bâtons pour ramasser les cochenilles
 d) Espèce de cochenille invasive

Sous abris

Au Mexique, la récolte des cochenilles a lieu environ trois mois après l'infestation ; cependant, elle peut être réalisée à n'importe quel moment de l'année et en utilisant une large gamme d'instruments (roseaux, cuillères en métal, brosses, bâtons et racloirs en plastique). La sélection de l'instrument le plus adapté dépend de différents facteurs : le mode d'élevage ; la superficie de la zone de culture ; et les caractéristiques du cultivar (plante inermes, épineuse ou même pubescente). Là où l'élevage de cochenilles est une activité récente, il y a peut-être besoin de développer de nouvelles techniques et instruments pour la récolte (Vigueras et Portillo, 2014).

Post-récolte

Les activités post-récoltes exigent le massacre (au Mexique cette étape est connue comme le « sacrifice »), le séchage (Santibáñez, 1990) et de le triage des cochenilles. Il y a plusieurs méthodes pour tuer les cochenilles :

- L'immersion dans l'eau bouillante (Alzate et Ramírez, 1777) ;
- L'asphyxie avec de la vapeur ;
- La congélation à des températures en dessous de 0°C (expérimental) ;
- La suffocation avec de l'hexane ;
- L'asphyxie dans des conteneurs hermétiques ;
- Le chauffage avec de l'air chaud, dans un four, sur des pots en argile (Télez, 1911) ou par les radiations solaires (températures autour de 40°C).

Pour sécher les cochenilles, des séchoirs solaires et des fours sont utilisés, mais aussi la lumière directe du soleil ou à l'ombre ; pour le séchage à l'ombre, le site doit être totalement sec. Le processus de tri implique la séparation des mâles, des cochenilles immatures, des mues, de la cire et de tout élément autre qu'une cochenille femelle adulte. Le tri prend aussi en compte la taille, puisque les plus grosses cochenilles signifient plus de pigment ; cependant, l'objectif final est d'obtenir des cochenilles avec une teneur élevée en acide carminique. Actuellement les cochenilles préférées ont les caractéris-

tiques suivantes :

- Teneur en acide carminique > 22% ;
- Taille de maille : 14 (> 1.295 cm) ;
- Impuretés < 1%.

Les cochenilles répondant à ces spécifications ont un marché ouvert ; autrement il n'y a pratiquement aucune demande et le prix est faible. Le prix de la cochenille est directement influencé par la teneur en acide carminique (1% = 1 \$ US), bien que le prix puisse varier en fonction du marché.

ÉCOLOGIE

Tous les organismes sont en interactions équilibrées avec les facteurs dominants dans leur environnement d'origine ; cependant, s'ils sont déplacés vers un nouvel environnement (zone non-originelle), l'équilibre peut être rompu. Cette perte d'équilibre engendre des conséquences, dont l'une est qu'ils peuvent devenir invasifs. Le contrôle biologique est l'outil le plus commun pour réduire les effets de ce phénomène, en contrôlant les espèces invasives étrangères jusqu'à ce qu'elles deviennent non invasives et naturalisées (Shine *et al.*, 2000).

Étant donné leur utilité pour le genre humain, les espèces d'*Opuntia* et de *Dactylopius* d'intérêt spécifique pour une production commerciale sont fréquemment déplacées de leur zone d'origine, les régions Néotropicales et Néarctique, et sont aujourd'hui présentes dans les régions Afrotropicales, Australasiennes, Paléarctiques et Orientales (Anderson, 2001; Bravo Hollis, 1978; Majure *et al.*, 2012b). Ces mouvements ont mené à la création de nouveaux problèmes d'adventices et de maladies, avec *D. opuntiae* dans les plantations d'*O. ficus-indica* au Brésil, en Espagne et dans d'autres pays du bassin méditerranéen (Portillo, 2009; Vasconcelos *et al.*, 2009). Les espèces de cochenille peuvent être considérées comme invasives ; la belle cochenille ou cochenille domestiquée (*D. coccus*) a été déclarée comme agent invasif en Éthiopie (Belay, 2015) (**Figure 3d**). Néanmoins, l'espèce est considérée comme un insecte utile dans le

TABLEAU 4 Espèces de *Dactylopius* utilisées pour contrôler les espèces invasives d'*Opuntia*

Espèce de cochenille	Espèce d' <i>Opuntia</i>	Pays	Source
<i>D. austrinus</i>	<i>O. aurantiaca</i> Guilles ex Lindley	Australie 1970 ; Afrique du Sud 1979	Moran and Cabby (1979)
<i>D. ceylonicus</i>	<i>O. vulgaris</i> Miller	Sri Lanka 1863	Volchansky <i>et al.</i> (1999)
<i>D. opuntiae</i>	<i>O. ficus-indica</i>	Afrique du Sud 1938	Moran and Zimmermann (1984a)
<i>D. opuntiae</i>	<i>O. stricta</i> Haworth	Australie 1921	Hoffmann <i>et al.</i> (2002)
<i>D. opuntiae</i>	<i>O. ficus-indica</i>	Brésil 2001 ^a	Batista <i>et al.</i> (2009)

^a Au Brésil la production de *D. opuntiae* n'était pas destinée au contrôle biologique ; elle est aujourd'hui devenue une espèce invasive, détruisant des milliers d'hectares de plantations de figuiers de Barbarie.

monde entier. Certaines espèces de *Dactylopius* ont été et sont encore utilisées comme agents de contrôle biologique de plusieurs espèces d'*Opuntia* considérées comme invasives (**Tableau 4**). Il y a un risque que de nouveaux problèmes continuent de survenir entre les cochenilles et les cultivars d'*Opuntia*.

D. coccus montre une capacité d'adaptation et une sélectivité pour des espèces ou cultivars particuliers d'*Opuntia* (Portillo *et al.*, 1992) et des comportements similaires sont rapportés pour *D. opuntiae* (Volchansky *et al.*, 1999 ; Githure *et al.*, 1999). Les cultivars de figuier de Barbarie ont été introduits dans de nombreux pays en dehors du Mexique et - du point de vue écologique - le figuier de Barbarie est souvent un facteur biotique étranger dans les aires non-originelles. Bien qu'il soit parfois considéré comme invasif, il est aujourd'hui devenu un élément utile, connu et apprécié par les habitants locaux. Il est utilisé de multiples manières et des relations

ethnobotaniques ont été établies dans de nombreuses communautés autour du monde. Néanmoins, la réalité est que de nouveaux facteurs biotiques peuvent survenir et on doit y faire face ; la cochenille sauvage (*D. opuntiae*), la mouche du cactus (*Cactoblastis cactorum*) et la maladie des points noirs (*Pseudocercospora opuntiae*) (**Figures 3e**) sont des menaces potentielles pour le figuier de Barbarie. Les frontières sanitaires pour les plantes doivent être plus strictes pour contrer les nouvelles infestations de la cochenille sauvage (*D. opuntiae*) qui surviennent constamment, plus récemment en Israël, au Liban, et au Maroc. La cochenille sauvage est une épidémie insidieuse et très agressive envers le figuier de Barbarie, comme cela a été démontré au Brésil (**Figure 3f**). Des efforts continus sont nécessaires pour gérer les invasions de *Dactylopius* et trouver une limite ; à cette fin, les auteurs sont actuellement en train de rassembler plus d'informations.



Figure 3
e) Taches noires
(*Pseudocercospora*
opuntiae)
f) cochenille sauvage



Maladies du figuier de barbarie

Giovanni Granata,^a Roberto Faedda^a et María Judith Ochoa^b

^a Département d'agriculture, Alimentation et Environnement, Université de Catane, Italie

^b Faculté d'Agronomie, Université Nationale de Santiago del Estero, Argentine



INTRODUCTION

Comme les autres cultures, le figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill.) souffre de plusieurs maladies biotiques et abiotiques; leur impact dépend de l'utilisation de la culture.

Il y a un manque d'informations précises sur l'étiologie et l'épidémiologie des pathogènes et la littérature scientifique ne couvre pas suffisamment la distribution géographique et l'impact économique global de nombreuses maladies du figuier de Barbarie. Néanmoins, il est certain que la plupart des maladies infectieuses sont causées par des champignons, alors qu'un très petit nombre de bactéries, phytoplasmes et virus sont signalés comme pathogènes.

A cause du climat sec des régions où le figuier de Barbarie est cultivé dans le monde, ces maladies deviennent problématiques seulement à certaines périodes quand les conditions sont favorables. Cependant de nos jours, l'accroissement de la culture du figuier de Barbarie, la plantation dense et le changement climatique, pourraient contribuer à une plus forte incidence et une plus grande sévérité des maladies, tout comme à l'émergence possible de maladies nouvelles ou inhabituelles. Une détection précoce, une identification précise et un suivi strict des maladies dans les champs et sur le matériel de multiplication sont essentiels pour éviter leur diffusion.

Ce chapitre fournit des descriptions concises des maladies les plus communes affectant le figuier de Barbarie et des recommandations pour leur contrôle.

MALADIES FONGIQUES

Cercosporiose

Agent responsable : *Pseudocercospora opuntiae* Ayala-Escobar, Braun & Crous.

Gamme d'hôtes : *Opuntia* spp., *Nopalea* spp.

Distribution géographique : Bolivie, Brésil, Mexique, Pérou.

Symptômes et signes : Les premiers symptômes sont une décoloration de la cuticule en forme de points circulaires ; elle devient transparente et huileuse en apparence et la zone centrale brune augmente de taille. Plus tard, les tissus du cladode présentent une couleur brunâtre à la marge des points qui virent au brun foncé, accompagnés d'un effondrement des tissus. Les tissus

affectés deviennent noirs ; des conidiophores et des conidies en forme de petites protubérances grises peuvent être observés (**Figure 1**). Enfin, la zone affectée s'écroule à travers l'autre face du cladode. Les blessures atteignent un diamètre de 3-4 cm à la fin de l'infection. Différents symptômes peuvent apparaître simultanément sur le même cladode (Ochoa *et al.*, 2015b). Des symptômes similaires ont été associés à l'antracnose causée par *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz & Sacc. Cependant, sur la base de tests de pathogénicité, Quezada Salinas *et al.* (2006) ont affirmé que *C. gloeosporioides* n'est pas la cause de la maladie des points noirs sur le figuier de Barbarie.

Gestion de la maladie : L'inspection des plantations de figuier de Barbarie après la saison des pluies pour détecter et éliminer les cladodes dès l'apparition des premiers symptômes de la maladie. Adopter une taille préventive pour permettre une bonne ventilation. Appliquer un fongicide à base de cuivre juste avant la saison des pluies.

Pourriture des cladodes et des fruits

Agent responsable : *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Giff. & Maubl. (téléomorphe: *Botryosphaeria rhodina* Berk. & M.A. Curtis, Arx).

Syn.: *Botryodiplodia theobromae* (Pat.).

Gamme d'hôtes : Plus de 500 hôtes, y compris les humains.

Distribution géographique : Afrique du Sud, Brésil, Egypte, Etats-Unis d'Amérique, Italie, Mexique.

Symptômes et signes : Des zones noires arrondies (15-50 mm de diamètre) apparaissent sur les cladodes laissant couler un exsudat de gomme noire depuis les marges de la lésion. Les pycnides sont souvent facilement visibles sur la surface de la zone infectée. Probablement, la même maladie a été signalée en tant que chancres gommeux sur des cladodes (**Figure 2**) à Linosa (Italie) et l'agent responsable est associé à *Botryosphaeria ribis* (syn. *Dothiorella ribis*) (Somma *et al.*, 1973).

Gestion de la maladie : Eviter les blessures, éliminer et détruire les spécimens malades. Appliquer des fongicides (thiabendazole et thiophanat-méthyl) reconnus efficaces pour réduire l'incidence de la maladie.

Pourriture sèche à alternaria (Alternariose)

Agent responsable : *Alternaria* spp.

Gamme d'hôtes : Très polyphage.



Distribution géographique : Argentine, Italie, Brésil, Egypte, Mexique, Afrique du Sud.

Symptômes et signes : Les premiers symptômes sont des points chlorotiques circulaires autour des épines ou des blessures sur les cladodes ou les fruits, qui, plus tard, deviennent sombres et nécrotiques (**Figure 3**). Les sites de pénétration du champignon sont généralement les épines, mais aussi les blessures sur la cuticule causées par la grêle. En Afrique du Sud, différentes espèces d'*Alternaria* ont été isolées de cladodes avec des symptômes de pourriture sèche (Swart et Kriel, 2002; Swart et Swart, 2002; Ammar *et al.*, 2004; Souza *et al.*, 2010). En Italie, *Alternaria alternata* produit des points dorés (**Figure 4**) sombres au centre et jaune doré sur les bords (Granata et Sidoti, 1997). La même maladie est connue, au Mexique, sous le nom de *mancha de oro* ou *secamiento de la penca* (Gutiérrez, 1992). *A. alternata* cause aussi le pourrissement post-récolte du fruit. Le symptôme est une pourriture sèche de la peau de couleur noire (**Figure 5**). Généralement, les lésions, avec une marge irrégulière, sont localisées dans la partie centrale du fruit et la peau pourrie peut être enlevée (Faedda *et al.*, 2015b).

Gestion de la maladie : Par une pulvérisation d'un fongicide, tel que le cuivre, le mancozebe ou l'iprodione pour un contrôle effectif de la maladie, spécialement après la grêle. Appliquer un traite-



Figure 1
Points noirs (Bolivie)

Figure 2
Chancre gommeux
(Ile de Linosa, Italie)

ment à l'eau chaude pour un contrôle efficace de la maladie en post-récolte.

Pourriture Armillaire de la tige et de la racine

Agent responsable : *Armillaria mellea* (Vahl) P. Kumm.

Gamme d'hôtes : Très polyphage.

Distribution géographique : Italie, Etats-Unis d'Amérique.

Symptômes et signes : La pourriture des racines et des tiges est causée par *Armillaria mellea*, un champignon basidiomycète qui colonise les rameaux et les racines principales de la plante et produit un mycélium blanc et des cordons d'hyphes, appelés rhizomorphes, qui se répandent depuis les tissus infectés et contaminent les plantes voisines. Les plantes infectées de figuier de Barbarie souffrent d'un déclin de turgescence des tissus, et de chlorose, résultats de la désorganisation du phloème et d'une nutrition en eau et minéraux altérée. Les fruits qui poussent sur les plantes infectées n'atteignent pas la maturité totale et restent momifiés sur le cladode. Les symptômes de pourriture des tiges basales peuvent être observés avec l'émission d'un exsudat visqueux. On peut trouver des éventails d'hyphes caractéristiques du mycélium blanc sous la surface des lésions. La portion pourrie de la tige a une bordure rouge vif qui

Figure 3
Pourriture sèche
Alternaria (Tunisie)



Figure 4
Points dorés (Italie)



Figure 5
Pourriture des fruits
Alternaria (Italie)



Figure 6
Pourriture blanche
(Pérou)

s'étend vers le haut au-dessus de la ligne du sol. La maladie peut affecter les racines principales (Raabe et Alcon, 1968; Magnano di San Lio et Tirrò, 1983). **Gestion de la maladie :** Puisque *Armillaria* persiste souvent dans le sol au niveau des résidus des cultures précédentes qui infectent inévitablement les nouvelles plantations, il est recommandé de ne pas cultiver les sols infectés par ce champignon pendant 2-3 ans et de retirer les sources d'inoculum (racines des cultures précédentes). Le contrôle chimique efficace n'est encore disponible.

Pourriture blanche ou Pourriture cotonneuse

Agent responsable : *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib) de Bary.

Gamme d'hôtes : Polyphage.

Distribution géographique : Chili, Mexique.

Symptômes et signes : Le champignon cause une pourriture blanche sur les cladodes (**Figure 6**).





Figure 7
Pourriture du pied
Phytophthora (Italie)



Figure 8
Moississure grise (Italie)

Les cladodes infectés initialement se décolorent et il s'en suit un léger ramollissement de la cuticule. Plus tard, ils deviennent sombres, s'écaillent et se couvrent d'une laine blanche. De nombreux sclérotés noirs apparaissent rapidement sur les tissus pourris (G. Granata, communication personnelle).

Gestion de la maladie : Retirer et détruire les cladodes infectés. Il est primordial d'empêcher les sclérotés de toucher le sol parce qu'ils y restent vivants de nombreuses années.

Rouille

Agent responsable : *Aecidium opuntiae* Magn.

Syn.: *Puccinia opuntiae* (Magnus) Arthur & Holw.

Gamme d'hôtes : *Opuntia* spp., *Bouteloua simplex* Lag.

Géographical distribution: Bolivie, Italie, Pérou.

Symptômes et signes : Connue sous le nom de « Roya » en Amérique du Sud, la maladie est causée par *Puccinia opuntiae*, qui produit des pustules jaune-orange sur la surface des cladodes ou des fruits. Pendant que les taches de rouille sèchent, un trou se développe sur le cladode. Une symptomatologie similaire a été décrite par Goidanich (1964) comme étant la rouille de gale et l'agent responsable attribué à *Phyllosticta opuntiae* Sacc. & Speg.

Gestion de la maladie : Retirer et enterrer les cladodes infectés.

Pourriture écailleuse

Agent responsable : *Scytalidium lignicola* Pesante.

Gamme d'hôtes : *Auricularia polytricha*, *Citrus paradisi*, *Mangifera indica*, *Manihot esculenta*, *Vanilla fragrans*, humains et animaux.

Distribution géographique : Brésil.

Symptômes et signes : La maladie est largement répandue sur le cactus fourrager (palma forrageira) dans la région nord-est du Brésil. Les symptômes commencent avec une pourriture sèche qui développe une forme écailleuse à la base

des cladodes (Souza *et al.*, 2010). Un exsudat de gomme jaunâtre abondant jaillit des tissus infectés. Ce champignon polyphage est un pathogène qui cause des infections de la peau, des ongles et des cheveux chez les humains.

Gestion de la maladie : A ce jour, il n'y a pas eu de recherches pour déterminer les conditions optimales pour le développement de la maladie. Retirer les plantes infectées pour réduire la quantité d'inoculum qui contamine les plantes à proximité.

Pourriture du pied *Phytophthora*

Agent responsable : *Phytophthora nicotianae* Breda de Haan.

Gamme d'hôtes: Le pathogène infecte les plantes d'environ 90 différentes familles et les différents isolats ont des gammes d'hôtes distinctes.

Distribution géographique : Italie.

Symptômes et signes : *Phytophthora nicotianae* est l'agent responsable de la pourriture du pied du figuier de Barbarie en Italie (Cacciola et Magnano di San Lio, 1988). Le symptôme le plus typique de la pourriture du pied est l'exsudat de gomme suintant de la base de la tige. Les plantes malades présentent des lésions gorgées d'eau avec une marge brune irrégulière à la surface de la tige basale et une pourriture molle des tissus internes qui deviennent bruns ou rougeâtres. Les plantes affectées se chlorosent, la croissance ralentit et les cladodes flétrissent faisant tomber la plante (**Figure 7**).

Gestion de la maladie : Les sols argileux où l'eau stagne sont sujets à héberger *Phytophthora*. Pour cette raison, cultiver le figuier de Barbarie dans des sols bien drainés pour éviter l'engorgement.

Pourriture du collet et de la tige due à *Pythium*

Agent responsable : *Pythium aphanidermatum* Edson (Fitzp.).

Gamme d'hôtes : Largement polyphage.

Distribution géographique : Mexique.

Figure 9

Pourriture du fruit
Penicillium (Italie)

**Figure 10**

Pourriture molle
Macrophomina (Italie)



Symptômes et signes : Les premiers symptômes sont des lésions molles, brun foncé sur le cladode au niveau de la ligne du sol. Les lésions atteignent progressivement les parties supérieures du cladode et puis s'étendent vers le cladode suivant. Les cladodes pourris sont reliés aux pourritures des racines. Les plantes malades s'effondrent finalement et les grandes plantes s'écroulent plus rapidement que les petites plantes (Rodríguez Alvarado *et al.*, 2001).

Gestion de la maladie : Eviter l'excès d'eau et maintenir un bon drainage du sol.

Fusariose ou pourriture racinaire

Agent responsable : *Fusarium oxysporum* f. sp. *opuntiarum* (Pettinari) W.L. Gordon.

Gamme d'hôtes : *Echinocactus grusoni*, *Schlumbergera truncate*.

Distribution géographique : Brésil, Italie

Symptômes et signes : Les plantes malades présentent une pourriture racinaire avec une décoloration rouge intense des tissus affectés. Si la pourriture racinaire devient sévère, les plantes infectées peuvent développer d'autres symptômes dont le retard de croissance et le flétrissement (Pettinari, 1951).

Gestion de la maladie : Planter dans des sols bien drainés et réduire la compaction du sol pour ne pas créer les conditions favorables à l'infection par les espèces de *Fusarium*.

Pourriture grise

Agent responsable : *Botrytis cinerea* Pers. (téléomorphe : *Botryotinia fuckeliana* [de Bary] Whetzel).

Gamme d'hôtes : Très polyphage.

Distribution géographique : Italie.

Symptoms and signs: Le pathogène pénètre par les plaies qui ont tendance à se produire quand le fruit est détaché des cladodes. La zone infectée du fruit est gris foncé et généralement circulaire ; les tissus internes sont décomposés et mous (**Figure**

8). (G. Granata, communication personnelle).

Gestion de la maladie : Eviter les blessures pendant la récolte et les opérations post-récolte.

Pourriture du fruit à *Penicillium*

Agent responsable : *Penicillium* spp.

Gamme d'hôtes : Très polyphage.

Distribution géographique : Mondiale.

Symptômes et signes : La pourriture à *Penicillium* est considérée comme une maladie majeure post-récolte des figues de Barbarie dans beaucoup de régions de production du monde. *Penicillium italicum* Wehmer et *P. digitatum* (Pers.) Sacc. sont rapportés être les principaux agents responsables de cette maladie (Schirra *et al.*, 1999b). D'autres espèces de *Penicillium* comme *P. citrinum* Thom, *P. expansum* Link (Scherm *et al.*, 2003 ; Oliveri *et al.*, 2007) et *P. polonicum* K.M. Zalesky (Faedda *et al.*, 2015a) sont signalées sur les figues de Barbarie en Italie (**Figure 9**). Des blessures physiques de la peau pendant la récolte, la manipulation et le stockage au froid prédisposent les fruits du figuier de Barbarie à l'infection par ce champignon. Les tissus infectés deviennent marrons, mous et aqueux. Les lésions s'élargissent, un mycélium blanc émerge des fissures de la peau en décomposition et une masse de spores bleu-vert apparaît à la surface de la peau le long des lésions.

Gestion de la maladie : Contrôler la maladie en récoltant et manipulant soigneusement les fruits pour réduire les dommages de la peau. Dans les bâtiments d'emballage et de stockage, des pratiques hygiéniques peuvent prévenir la sporulation des fruits malades et réduire la quantité d'inoculum.

Pourriture molle due à *Macrophomina*

Agent responsable : *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid.

Gamme d'hôtes : Polyphage avec plus de 500 plantes hôtes.

Distribution géographique : Italie.

Symptômes et signes : Les symptômes commencent avec une pourriture molle brune ayant pour origine la portion proximale et s'étendant au fruit entier après la récolte (Faedda *et al.*, 2015b). A un stade avancé, la zone infectée est couverte d'une masse mycélienne (**Figure 10**). *Macrophomina* a aussi été signalé au Brésil et au Mexique, causant la pourriture charbonneuse sur les figuiers de Barbarie à fourrage (Oliveira *et al.*, 2003; Méndez Gallegos *et al.*, 2009).

Gestion de la maladie : A ce jour, il n'y a pas eu de recherche sur le contrôle de cette maladie.

Autres champignons

A côté de ceux discutés ci-dessus, plusieurs autres champignons ont été trouvés sur des cladodes et des fruits de figuier de Barbarie. Cependant, beaucoup d'entre eux sont saprophytes ou pathogènes secondaires, souvent récupérés sur des plantes affaiblies et leur rôle comme pathogène primaire n'a pas été clairement prouvé. Les champignons les plus fréquemment rencontrés sont décrits ci-dessous :

- *Aspergillus niger* - trouvé en Egypte sur des cladodes et des fruits pourris (Ammar *et al.*, 2004).
- *Candida boidimi* - associé à une pourriture molle des cladodes et des fruits en Italie (Granata et Varvaro, 1990).
- *Capnodium* spp. et autres champignons - Au Mexique, ils causent la fumagine une moisissure qui rappelle la suie (Méndez Gallegos *et al.*, 2009; Mondragón Jacobo *et al.*, 2012).
- *Cercospora* sp. - signalé en Bolivie et au Pérou, il provoque des marques nécrotiques circulaires de couleur grise sur les cladodes (Granata and Sidoti, 2002).
- *Colletotrichum gloeosporioides* - trouvé au Brésil, en Corée et au Mexique, il est à l'origine de l'anthraxose des cladodes. Les symptômes consistent en marques brun-foncé qui habituellement commencent sur les bords de la raquette et s'étendent ensuite sur toute la raquette (Osada and Càrcamo, 1991; Kim *et al.*, 2000; Souza *et al.*, 2010).
- Espèces de *Fusarium* - trouvées sur le figuier de Barbarie dans de nombreux endroits du monde, dont le Brésil, l'Égypte, l'Afrique du Sud et le Mexique (Swart and Kriel, 2002; Ammar *et al.*, 2004; Swart, 2009; Souza *et al.*, 2010):
 - *Fusarium oxysporum*, *F. proliferatum* et *F. sporotrichoides* - associés à des lésions nécrotiques sèches des cladodes.
 - *F. solani* - signalé comme agent responsable de la pourriture de l'apex.
 - *F. lunatum* - signalé comme l'agent responsable de marques circulaires sur les cladodes.

- *Cladosporium* sp. - associé à des marques sur les raquettes au Mississippi, États-Unis d'Amérique (msucare.com).
- *Curvularia lunata* - signalé au Brésil et au Mexique comme cause des symptômes de marques circulaires sur les cladodes (Souza *et al.*, 2010; Flores Flores *et al.*, 2013).
- *Cylindrocarpon* sp. - rencontré en Afrique du Sud associé à la nécrose des cladodes (Swart and Swart, 2002).
- *Hendersonia opuntiae* - cause une maladie connue sous le nom de « brûlure » ou « brûlure du soleil ». Les symptômes sont des marques qui sont, au début, distinctivement zonées et s'élargissent plus tard jusqu'à ce que le cladode entier devienne brun rougeâtre. Le centre de la zone malade est brun grisâtre et craquelé (Horst, 2013).
- *Mycosphaerella* sp. - engendre des marques nécrotiques sur les cladodes en Amérique du Sud. Au Mexique cette maladie est connue sous le nom de « *mancha plateada* » in Mexico (Granata, 1995).
- *Phoma* sp. - rencontré en Argentine, à l'origine des marques nécrotiques sur les cladodes (Granata, 1995).
- *Pleospora* sp. - cause des marques nécrotiques sur les cladodes (Granata, 1995).
- *Pollaccia* sp. - signalé comme responsable de la pourriture des cladodes sur les cactus inermes dans la région d'Alagoas (nord-est du Brésil) (Franco and Ponte, 1980).
- *Rhizopus* sp. - rencontré au Brésil et en Afrique du Sud (Swart and Swart, 2002; Souza *et al.*, 2010).

MALADIES BACTÉRIENNES

Pourriture bactérienne molle noire

Agent responsable : *Erwinia carotovora* subsp. *Carotovora*.

Gamme d'hôtes : Polyphage.

Distribution géographique : Argentine, Italie.

Symptômes : Au printemps, les cladodes montrent des taches aqueuses qui deviennent brunes et coalescentes (**Figure 11**). Les tissus externes sèchent et souvent se craquelent ; les tissus internes deviennent bruns à presque noirs. Ces symptômes peuvent aussi être observés sur les fruits (Varvaro *et al.*, 1993; Saad *et al.*, 1998).

Gestion de la maladie : Supprimer et détruire les segments infectés. Pulvériser immédiatement avec des composés cuivrés dans les situations à risque élevé, telles qu'après un vent fort ou une grêle importante.



Galle du collet

Agent responsable : *Rhizobium radiobacter* ((anciennement connue comme *Agrobacterium tumefaciens*).

Gamme d'hôtes : Très polyphage avec plus de 90 familles de plantes.

Distribution géographique : Mexique.

Symptômes et signes : Une excroissance tumorale (galle) se forme à la base de la tige. La couleur de la galle varie du brun au noir et se fissure à maturité. La tumeur sur la tige basale varie de taille avec des diamètres ≤ 15 cm (Gutiérrez, 1992).

Gestion de la maladie : Ne pas planter des variétés sensibles dans les sols connus être infectés par ce pathogène. Un traitement préventif des boutures avec un organisme de biocontrôle non pathogène, *A. radiobacter*, est relativement économique et constitue un moyen efficace de gérer le développement de la galle de la couronne dans les exploitations commerciales.

PHYTOPLASMES ET MALADIES VIRALES

L'une de plus sérieuses maladies dans les vergers de figuier de Barbarie signalée au Mexique est communément appelée *engrosamiento de cladodios* (épaississement des cladodes) ou macho (Pi-

menta Barrios, 1990). Les symptômes typiques de cette maladie - causée probablement par un phytoplasme - sont de sévères retards de croissance des cladodes, des fleurs et des fruits. La maladie se produit aussi aux Etats-Unis d'Amérique (Californie), où elle est apparue au milieu des années 1980, et en Afrique du Sud (Felker *et al.*, 2010).

En Italie, les symptômes de malformations, retards de croissance et manque de production de fleurs, de fruits et d'épines sur les plantes de figuier de Barbarie ont été attribués à une souche de phytoplasme appartenant au sous-groupe ribosomal 16SrII-C (**Figure 12**) (Granata *et al.*, 2006 ; Tessitori *et al.*, 2006).

Bertaccini *et al.*, (2007) ont identifié deux phytoplasmes différents (16SrI-B et 16SrV-A) associés à des échantillons de figuier de Barbarie touchés par la maladie de l'épaississement des cladodes en Californie.

Figure 11
Pourriture molle noire
(Italie)



Figure 12
Maladie
phytoplasmique (Italie)



Les symptômes de malformation du cladode, la prolifération des bourgeons, l'épaississement et la forme en cœur des cladodes, avec l'arrêt de la croissance de la plante et le jaunissement des cladodes ont été observés sur les Pyramides de Saint Martin (nord-est de l'Etat de Mexico) et reliés au sous-groupe de phytoplasme de 16SrII (Hernández Pérez *et al.*, 2009a). Plus tard, Fucikovsky Zak *et al.*, (2011) ont signalé les symptômes de phytoplas-mose sur les plantes de figuier de Barbarie dans la région de Nopaltepec (Etat de Mexico) en lien avec le groupe de phytoplasmes 16SrI (souche jaune d'aster, *Candidatus* phytoplasma asteris). Plus récemment, dans la même région, les symptômes de distorsion et d'épaississement du cladode, la mosaïque, le jaunissement, la prolifération et la déformation des fruits ont été observés sur les plantes de figuier de Barbarie mais l'agent responsable a été attribué à la virescence de la pervenche mexicaine - le phytoplasme 16SrXIII (Suaste Dzul *et al.*, 2012b).

Felker *et al.* (2010) ont signalé qu'en Californie la maladie de l'épaississement du cladode était causée par le virus de l'apex buissonneux du tabac et il est possible que les symptômes observés au Mexique, en Afrique du Sud et en Italie soient induits par ce même virus. Des résultats similaires ont été obtenus par Suaste Dzul *et al.* (2012a), qui ont démontré la présence d'un virus dans des échantillons de figuier de Barbarie de Nopaltepec montrant un épaississement et le syndrome de la mosaïque sur les cladodes. Par conséquent, la co-infection entre le phytoplasme et le virus a été vérifiée dans ce syndrome.

Les maladies virales et phytoplasmes de cette culture sont difficiles à contrôler à cause du manque d'études scientifiques sur la sensibilité des cultivars et les insectes vecteurs.

DÉSORDRES ABIOTIQUES

Il y a peu de publications scientifiques sur les maladies non infectieuses du figuier de Barbarie. Les désordres abiotiques les plus communs se produisant occasionnellement dans certaines régions de production de figuier de Barbarie sont rapportés ci-dessous.

Les blessures dues au froid

Les dommages dus aux températures inférieures à -5°C peuvent avoir un effet radical sur la plante entière ou affecter seulement une petite partie des tissus de la plante, réduisant le rendement ou seulement la qualité du produit. La sensibilité au froid varie en fonction de l'âge et du stade physiologique de la plante et aussi du cultivar. Les fruits en maturation sont les plus sensibles aux blessures du froid, qui forment des taches nécrotiques à la surface de l'écorce (**Figure 13**).

Les blessures de grêle

Le degré des dommages causés par la grêle sur le figuier de Barbarie dépend de la durée et de l'intensité de la tempête mais aussi du stade de développement de la plante. Les blessures de grêle engendrent des plaies au point d'impact ; même les jeunes cladodes et les fruits peuvent être perforés par les impacts des grêlons (**Figure 14**). Puisque les tissus blessés fournissent une porte d'entrée aux bactéries et champignons dans la plante, un traitement protecteur à base de cuivre appliqué rapidement après l'évènement peut éviter une infection. Les cladodes et les fruits sévèrement endommagés devraient être enlevés dès que possible.



13



14

Figure 13
Blessure du froid (Italie)

Figure 14
Blessure de grêle (Italie)

Figure 15

Blessure de glyphosate
(Italie)

**Figure 16**

Fissuration du fruit
(Italie)



Dégâts d'herbicide

Les symptômes de toxicité d'un herbicide varient selon le type d'herbicide appliqué, la concentration du produit et les facteurs environnementaux (**Figure 15**).

Fissuration du fruit

Bien que la cause exacte soit inconnue, la fissuration du fruit se produit quand les plantes absorbent l'eau de pluie ou d'irrigation après une longue période sèche, le fruit augmente de volume. La peau se déchire en une fissure traversant ce fruit (**Figure 16**).

Insectes ravageurs du figuier de Barbarie

Jaime Mena Covarrubias

Institut National de Recherche en Foresterie, Agriculture et Elevage, Mexique



Insectes ravageurs du figuier de Barbarie

INTRODUCTION

La famille des Cactaceae est un groupe de plantes très distinctes avec des caractéristiques particulières de croissance et de comportement, et elle a naturellement développé son propre complexe d'insectes. En effet, plus de 160 espèces d'insectes sont nuisibles pour les cactus (Dodd, 1940 ; Mann, 1969 ; Zimmerman et Granata, 2002), et sont principalement, mais pas uniquement, des ennemis des cactus.

Les insectes des cactus se sont adaptés aux conditions générales des régions dans lesquelles leur plantes hôtes croissent. Par exemple, la plupart des stades adultes d'insectes coléoptères et de lépidoptères sont actifs seulement pendant la nuit et leur développement immature a lieu dans les tissus internes des cladodes, des branches et des tiges de cactus ; en fait, 75% de tous les insectes se nourrissant de cactus le font de l'intérieur de la plante (Zimmermann et Granata, 2002). Ces insectes ont aussi adapté leur structure et leurs habitudes au cactus, et les punaises et les lépidop-

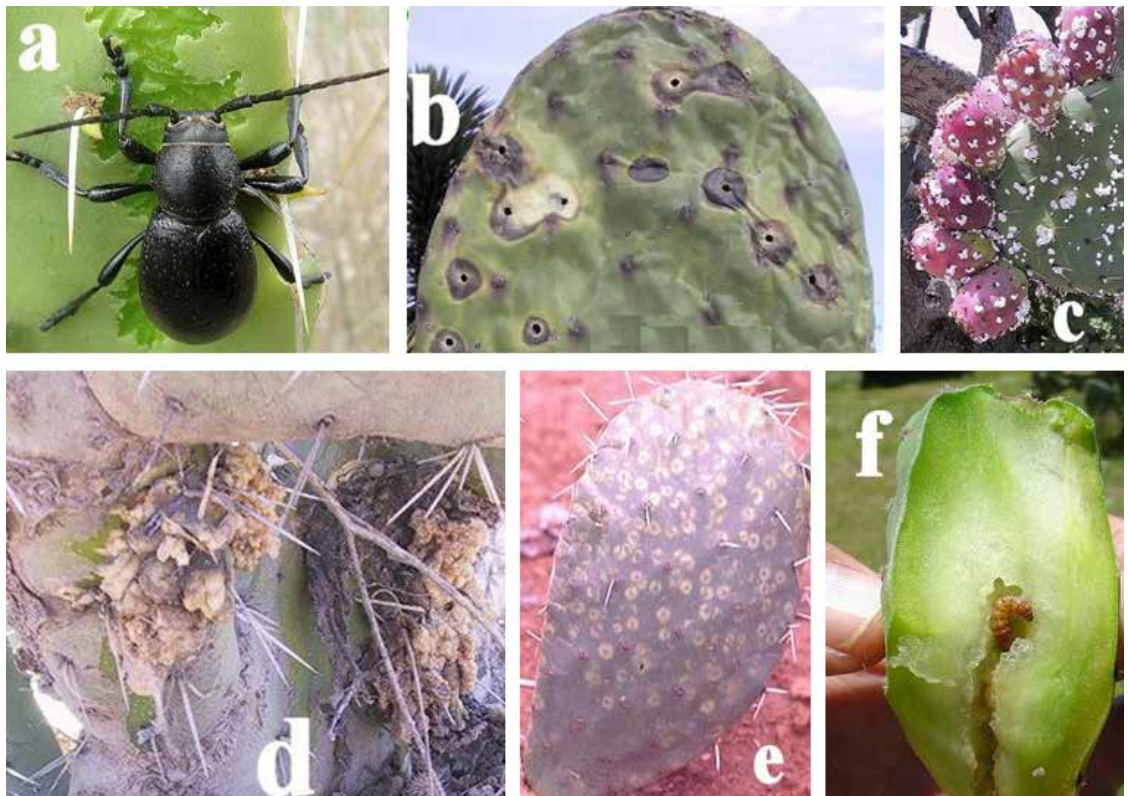
tères pondent souvent leurs œufs sur les épines des cladodes. Aucune partie de la plante de cactus n'échappe aux blessures : les espèces d'insectes attaquent les racines, les tiges, les cladodes et les fruits (**Figure 1**).

Les blessures d'insectes dans les vergers de cactus affectent autant la quantité et la qualité de la récolte que la durée de vie productive de la plante. En général, les insectes qui se nourrissent sur les fruits représentent un risque plus important de perte de récolte que ceux qui se nourrissent sur les tiges et les cladodes. La densité d'insectes joue aussi un rôle important dans la définition du statut d'un insecte comme ravageur.

INSECTES

Ce chapitre présente les principaux groupes d'insectes qui se nourrissent sur les cactus dans le monde, avec une attention sur l'identification, l'écologie et la biologie, ainsi que la stratégie de gestion du ravageur.

Figure 1
Dégâts d'insectes sur des plants de cactus :
a) *Moneilema* adulte sur un cladode tendre,
b) symptômes de criblure,
c) infestation de cochenilles sauvages sur les fruits,
d) exsudats de gomme dure sur la tige principale du cactus à cause de larves de *Metamasius*,
e) dégâts de punaise grise, et
f) Larves de *Metapleura* à l'intérieur d'un fruit de cactus



Cochenille cotonneuse (*Dactylopius opuntiae*, Homoptère : *Dactylopiidae*)

Actuellement, la cochenille cotonneuse (*Dactylopius opuntiae*) peut être considérée comme l'insecte ravageur le plus important dans les vergers de cactus dans le monde. Au Brésil, elle a infesté 100 000 ha de cactus cultivés pour la production de fourrage, réduisant la productivité de 80% (Lobos *et al.*, 2013) ; au Mexique, elle est le facteur biotique qui limite le plus la production de figes de Barbarie (Mena Covarrubias, 2011) ; et en Afrique du Sud, elle est un des deux plus importants ravageurs limitant la production de fruits et de fourrage (de Waal *et al.*, 2013b).

D. opuntiae est caractérisée par sa reproduction sexuelle et son dimorphisme sexuel. La femelle a un cycle de vie à quatre stades (œuf, premier stade larvaire, second stade larvaire, adulte) alors que le mâle a un cycle de vie à six stades (œuf, premier stade larvaire, second stade larvaire, pré-pupe, puppe, adulte). La durée du cycle de vie dépend de nombreux facteurs, mais certaines caractéristiques sont communes. L'œuf est ovale et rouge brillant ; l'éclosion peut se produire à l'intérieur de la femelle adulte; ou la larve baladeuse (premier stade larvaire) peut éclore quelques minutes seulement après que l'œuf ait été pondu (Flores Hernandez *et al.*, 2006). Pour les femelles, le stade larvaire dure 18.1 jours; il est suivi par une phase de pré-oviposition

durant 18.8 jours ; et finalement la femelle reste 22 jours au stade d'oviposition. En moyenne, une femelle pond 131 œufs (l'intervalle est de 62 à 617) (Flores Hernandez *et al.*, 2006). Les mâles adultes ressemblent à une petite mouche avec deux longs cerques. Les mâles utilisent le vol pour localiser les partenaires et ont une vie courte. La cochenille cotonneuse est facilement reconnaissable: de grandes masses laineuses de cire blanche couvrent leur corps et, quand elles sont écrasées, la couleur cramoisie brillante de leurs fluides corporels s'échappe et contraste avec la couleur cotonneuse (**Figure 2**).

La réussite de la colonisation d'une nouvelle plante de cactus dépend du premier stade larvaire de la femelle, parce que c'est le seul stade avec des pattes fonctionnelles (**Figure 2b**). Elles développent aussi de longs filaments dorsaux cireux, qui sont bien développés au moment où les larves baladeuses ont 2-3 jours. Pour préparer leur dispersion, les larves baladeuses femelles grimpent au sommet du cladode de la plante hôte et « décollent » grâce au vent (Mow *et al.*, 1982).

Les cochenilles vivent à la surface du cactus, habituellement en agrégats ou en colonies composées d'individus à différents stades de développement, installées à la base des épines. Tous les dégâts d'alimentation sont causés par les femelles et les nymphes car elles aspirent la sève des cladodes et

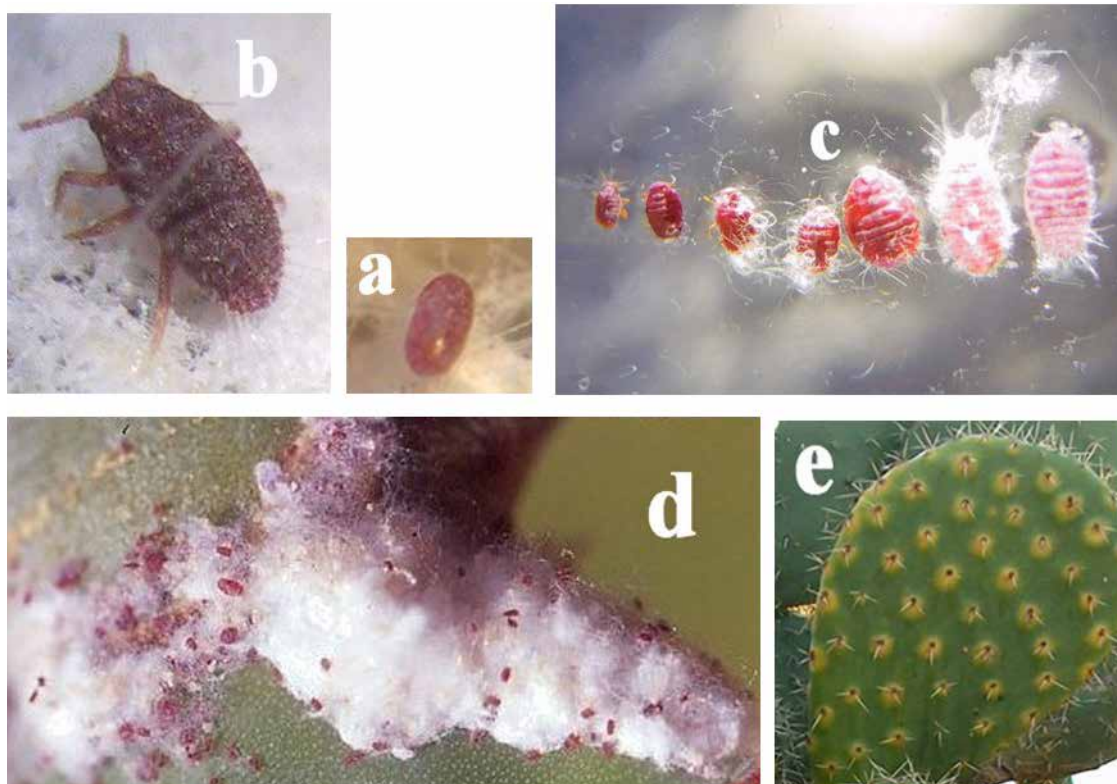


Figure 2

Stades de vie de la cochenille sauvage, *Dactylopius opuntiae* :
 a) œuf,
 b) larve baladeuse,
 c) différents stades de développement immature,
 d) colonie de plusieurs femelles adultes avec quelques larves baladeuses sur elles, et
 e) dégâts d'alimentation sur un cladode.

des fruits. Quelques semaines après leur installation sur une plante, des zones jaunes apparaissent sur le cladode (**Figure 2e**) qui finalement tombe. Bien que de nouveaux cladodes puissent pousser, ils vont aussi tomber si les cochenilles restent sur la plante. En fonction de la sévérité de l'infestation, le tronc peut aussi mourir. Les cochenilles mâles ne se nourrissent jamais quand ils sont adultes. Pour le contrôle, le premier stade larvaire est le plus sensible et la cible la plus aisée.

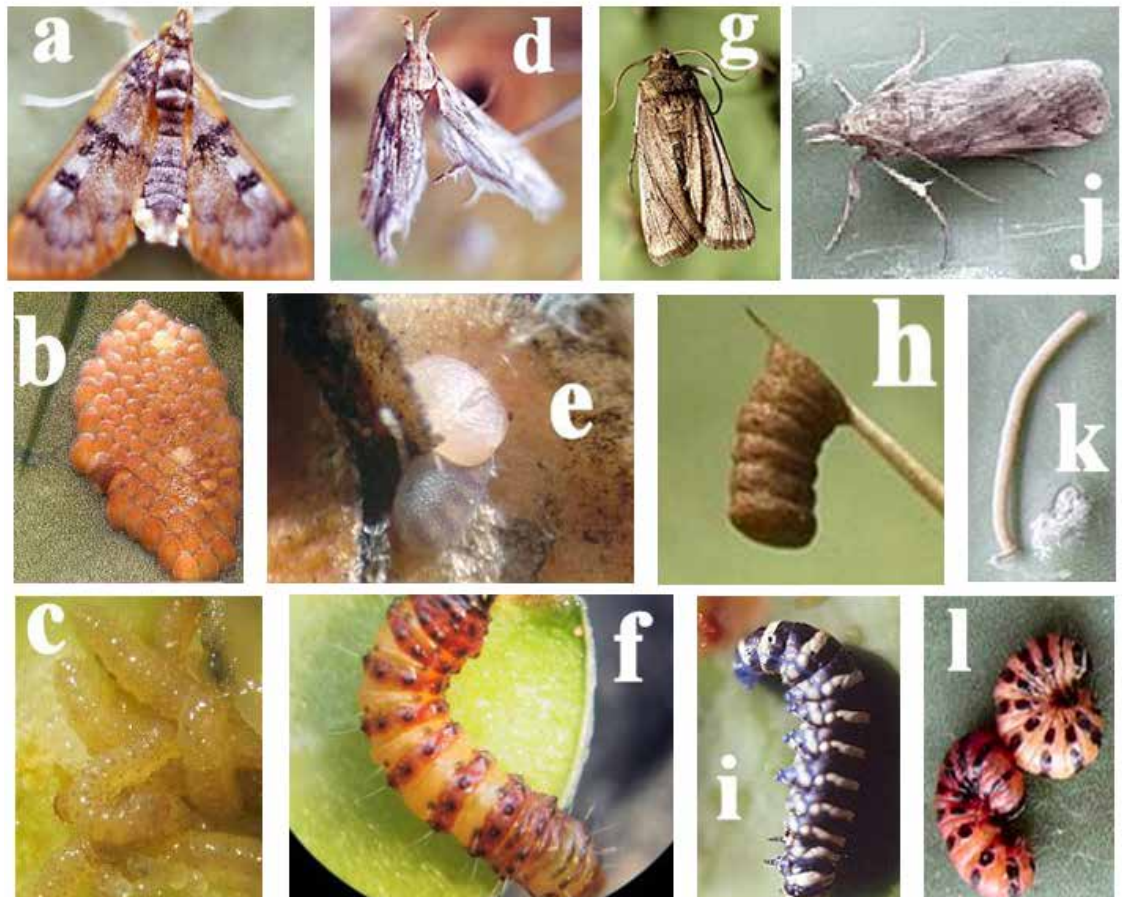
Lépidoptères ravageurs

Les mouches mineuses Pyralidés sont les plus importants et abondants insectes des cactus; cette famille comprend environ 50% plus d'espèces de ravageurs que les longicornes des cactus et 66% en plus que les charançons des cactus (Moran, 1980 ; Zimmermann et Granata, 2002). La mouche du cactus (*Cactoblastis cactorum*), le vers zèbre du cactus (*Olycella nephelepsa*), le vers blanc du cactus (*Megastes cyclades*) et la mineuse des jonctions des raquettes de cactus (*Metapleura potosi*) sont quatre des plus importants insectes lépidoptères ravageurs se nourrissant sur les plantes de cactus. *Cactoblastis* représente le plus fort risque

de dommages puisqu'il est déjà présent en Amérique du Sud et en Afrique du Sud, et il menace d'envahir les zones de production commerciale de figuier de Barbarie aux Etats-Unis d'Amérique et au Mexique (Zimmermann et Granata, 2002). Ces quatre insectes lépidoptères se nourrissent tous à l'intérieur des cladodes; *Metapleura* envahit aussi les fruits, en creusant du cladode vers le fruit et il ne laisse aucune trace du point d'entrée (Mena Covarrubias, 2013).

Les larves totalement développées de *Cactoblastis*, *Olycella* et *Metapleura* ont toutes une coloration corporelle brillante. Les larves de *Cactoblastis* sont d'un orange brillant uniforme, ou orange-rouge avec des rangs transversaux de gros points noirs (**Figure 3i**); les larves d'*Olycella* sont bleu foncé ou bleu-noir avec des bandes transversales blanches (**Figure 3i**) ; les larves ternes rouge-orange-jaune de *Metapleura* ont aussi des rangs transversaux de petits points noirs sur un fond orange brillant (**Figure 3f**). Au contraire, les larves de *Megastes*, sont de couleur blanc crème, avec un point brun clair de chaque côté des segments (**Figure 3c**). Les femelles de *Cactoblastis* et *Olycella* pondent leurs œufs en chaînes appelées « tiges d'œufs » attachées aux épines des cladodes. Il y a 35 à 150 œufs sur une

Figure 3
Insectes lépidoptères ravageurs et leurs stades développement :
a) *Megastes cyclades* adulte,
b) amas d'œufs et c) larves ;
d) *Metapleura potosi* adulte,
e) œufs et f) larve ;
g) *Olycella nephelepsa* adulte,
h) amas d'œufs et i) larve ;
j) *Cactoblastis cactorum* adulte,
k) amas d'œufs et l) larves.



seule tige d'œufs de *Cactoblastis* (Mann, 1969), et ils sont empilés les uns sur les autres comme s'ils faisaient partie des épines de la plante (**Figure 3k**) ; les tiges d'œufs d'*Olycella* ont seulement 1 à 8 œufs et sont attachées à angle droit sur l'épine (**Figure 3h**), presque parallèles au cladode du figuier de Barbarie. Les femelles de *Megastes* pondent des masses de 40 à 90 œufs sur la surface des cladodes, les bords des œufs se superposant comme les tuiles d'un toit (**Figure 3b**). Les œufs de *Metapleura* sont pondus isolément sur les craquelures, les jonctions et la surface des raquettes des cactus (**Figure 3e**). Au stade adulte, ces quatre insectes sont des papillons de nuit avec une activité nocturne (**Figure 3a, 3d, 3g et 3j**).

Les larves de *Cactoblastis* peuvent détruire totalement une plante, de taille petite à moyenne, en une seule saison : elles consomment tous les tissus internes du cladode et les larves peuvent laisser la raquette vide et se déplacer en groupe vers les raquettes voisines intactes. *Cactoblastis* peut aussi avoir deux ou trois générations par an. Les larves de *Megastes* ne sont pas aussi mobiles et destructrices que celle de *Cactoblastis*, mais les galeries faites par leurs larves tous les ans engendrent l'effondrement des branches principales et des tiges des cactus. *Megastes* a seulement une génération par année, mais il attaque parfois la même plante pendant plusieurs années consécutives. *Metapleura* représente un risque élevé pour les producteurs vendant des fruits frais de cactus parce qu'il est difficile de détecter les fruits infestés; le consommateur le réalise seulement quand il est trop tard, avec des conséquences négatives pour la relation producteur-consommateur. Il peut parfois y avoir jusqu'à 15-20 larves de *Metapleura* sur le même cladode, induisant une pourriture partielle ou, si les dégâts sont sur les jonctions, la chute des cladodes au sol; cependant, dans la plupart des cas, les dommages ne sont pas significatifs. Enfin, *Olycella* attaque seulement les jeunes vergers de cactus dans leurs trois premières années; les dégâts sont localisés, et les ravageurs isolés sont trouvés dans des excavations en dessous de gonflement ressemblant à des tumeurs sur les cladodes.

Pour le contrôle de tous ces ravageurs la cible est les larves nouvellement écloses, mais la fenêtre d'opportunité varie d'une journée, à peine, (*Cactoblastis*) à quelques jours (les autres espèces). Les tiges d'œufs de *Cactoblastis* sont les cibles les plus faciles : elles sont faciles à repérer et elles restent dans le champ au moins 3 semaines avant d'éclore (Mann, 1969).

Charançons du cactus (*Curculionidae*)

Le charançon du cactus (*Metamasius spinolae*), le charançon cribleur (*Gerstaeckeria* spp.) et le charançon de l'aréole (*Cylindrocopturus biradiatus*) sont trois des

plus importants insectes ravageurs Curculionidés pour les cactus. *Metamasius* représente le plus grand risque, puisque seulement quelques larves se nourrissant à la base de la tige peuvent détruire une plante entière; les deux autres genres se nourrissent principalement sur les cladodes.

Les charançons sont facilement identifiables au stade adulte par leur long rostre; chez *Metamasius* il fait 22 à 25 mm de long, pour *Gerstaeckeria* 0.5 à 0.6 cm et pour *Cylindrocopturus* 3 à 3.5 mm. *Metamasius* est caractérisé par des élytres noires avec deux marques oranges (**Figure 4a**) ; *Gerstaeckeria* a communément un corps brun-noir avec des écailles blanches (**Figure 4i**) ; *Cylindrocopturus* est de couleur argentée avec une marque en double croix jaune au milieu du corps (**Figure 4e**). Les larves de ces scarabées Curculionidés sont des vers blancs sans pattes avec une tête brune (**Figures 4c, 4g, 4j**).

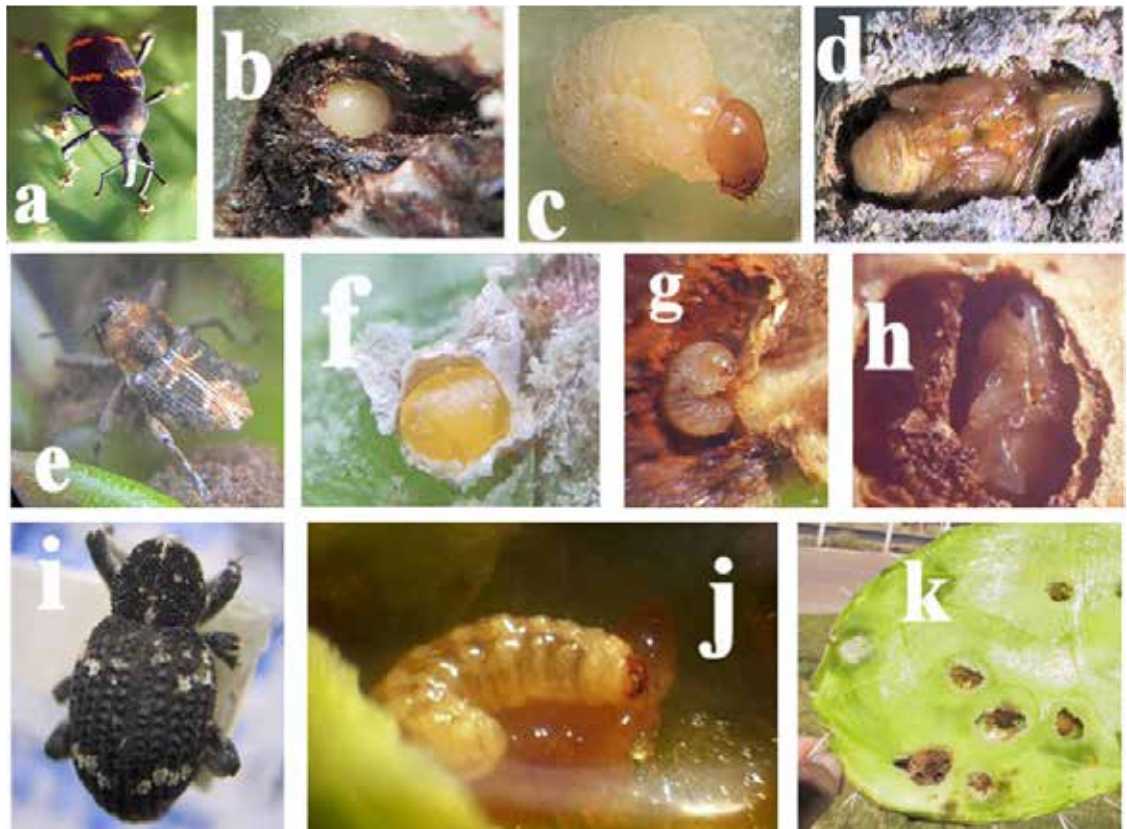
Metamasius et *Gerstaeckeria* sont des charançons qui ne volent pas; les adultes *Gerstaeckeria* sont actifs seulement la nuit. Le charançon du cactus est potentiellement présent toute l'année, mais les pics d'émergence commencent au début de la saison des pluies; les charançons cribleurs et ceux des aréoles sont communs de mars à septembre. La femelle du charançon du cactus creuse dans les tissus des cladodes, pond un œuf et referme le trou avec un mélange de nourriture et de salive régurgitée. Ils ont une seule génération par an, mais les adultes ont une longue durée de vie: pour *Metamasius* supérieure ou égale à 1 an et pour *Gerstaeckeria* et *Cylindrocopturus* 4 à 5 mois (Dodd, 1940 ; Mann, 1969 ; Mena Covarrubias, 2013).

La plupart des dommages causés au cactus le sont par les larves puisqu'elles se nourrissent des tissus internes et créent des conditions favorables à la pourriture, spécialement dans le cas de *Metamasius* et, dans une moindre mesure, *Gerstaeckeria*. Les larves de *Metamasius* sont très mobiles, allant des tiges vers les parties plus basses des branches principales, de manière à obtenir un meilleur approvisionnement en nourriture. Il est commun de trouver des cladodes seuls, des branches ou des plantes entières tombés au sol ; les insectes opportunistes augmentent fortement la pourriture dans les zones infectées (Dodd, 1940 ; Mann, 1969 ; Mena Covarrubias, 2012). Les adultes préfèrent se nourrir sur les jeunes cladodes; *Gerstaeckeria* et *Cylindrocopturus* les utilisent aussi pour l'oviposition et le développement des larves, alors que *Metamasius* préfère les tiges et les cladodes plus anciens pour ces activités.

L'adulte est le seul stade qui vie à l'extérieur de la plante et pour cette raison, il est la cible principale du contrôle. Cependant, la taille pourrait être une excellente option pour contrôler les larves et les pupes de *Gerstaeckeria* et de *Cylindrocopturus* pendant les mois d'hiver.



Figure 4
Charançons, insectes ravageurs du cactus et leurs stades de vie :
a) *Metamasius spinolae* adulte,
b) œuf, c) larve et d) pupa ;
e) *Cylindrocopturus biradiatus* adulte,
f) œuf, g) larve et h) pupa ;
i) *Gerstaeckeria* spp. adulte,
j) larve,
k) dégâts de la larve à l'intérieur du cladode



Scarabées longicornes (Cerambycids)

Ce groupe est représenté par le genre *Moneilema* (*M. variolis* est une des espèces les plus communes dans les vergers de cactus). Ils peuvent infliger des dégâts importants et deux ou trois larves seulement à la base d'un cactus pleinement développé peuvent mener à l'effondrement de la plante. Ils se nourrissent aussi à la base des jeunes plantes et présentent le même risque de dommages que le charançon *Metamasius*. Ces cérambycids sont des scarabées noir brillant robustes ; les élytres et le prothorax présentent parfois des marques blanches irrégulières. Leur longueur est de 15 à 25 mm (les mâles sont plus petits que les femelles) et les antennes dépassent la moitié du corps de l'insecte (**Figures 1a et 5a**). La larve est blanche et chaque segment est profondément plié le long du corps; la longueur varie entre 15 et plus de 40 mm; la tête est noire (**Figures 5a et 5c**).

Les *Moneilema* sont des insectes nocturnes qui ne volent pas; cependant, les jours nuageux, ces scarabées sont aussi actifs le matin. Les adultes vivent plusieurs mois et sont présents de mars à novembre. Les œufs sont pondus isolément et collés à la surface des segments matures, dans des craquelures, contre les tiges ou juste en dessous du

niveau du sol (Mann, 1969). Il y a une ou deux générations par an; dans le cas de deux générations, l'émergence de printemps est plus importante que celle d'automne (Dodd, 1940 ; Mann, 1969).

Les larves infestent la tige principale et les plus vieilles jonctions du figuier de Barbarie, creusant des galeries remplies d'un copieux exsudat qui noircit vite. Les insectes saprophytes sont attirés par ces zones d'alimentation et contribuent à leur expansion. Les larves bougent considérablement dans les cactus, généralement vers le bas, finissant dans la tige basale des vergers récemment plantés. Par contre, les adultes se nourrissent superficiellement en rongant les bords des raquettes nouvellement formées et occasionnellement les fruits (**Figures 1a et 5a**).

Le stade adulte est la cible du contrôle, parce que les larves sont difficiles à localiser et à contrôler à l'intérieur de la plante.

Insectes suceurs de plantes

Peu d'insectes se nourrissent de cactus avec des pièces buccales pour mordre ou mâcher - probablement à cause de l'absence de véritables feuilles sur les cactus (Dodd, 1940). Les plus communs sont les punaises, les cochenilles, les thrips

et les coccidae. Les coreidae du genre *Chelinidea* et *Narnia* ainsi que la miride rouge (*Hesperolabops*) sont de bons exemples d'insectes suceurs. Ces insectes représentent moins de risques de dégâts sur les cactus en comparaison avec les lépidoptères, les charançons, les scarabées longicornes ou les cochenilles ravageuses décrites ci-dessus; leur activité alimentaire représente très rarement un risque de destruction du cactus. Les dommages les plus communs du point de vue du producteur sont la réduction de la qualité du fruit du cactus. *Hesperolabops* a le potentiel le plus élevé pour engendrer des dommages parce qu'il forme de plus grandes populations, se nourrit sur les cladodes et les fruits (*Narnia* aussi est un insecte qui se nourrit sur le fruit) et il est difficile à contrôler.

Au stade adulte, la punaise grise du cactus, *Chelinidea tabulata* (Burmeister), a un corps brun-vert; le premier stade des larves nouvellement écloses sont noires, devenant vert clair en vieillissant; les adultes font 13-15 mm (**Figure 6a et 6c**). La punaise du fruit du cactus, *Narnia femorata* Stål est de couleur violet profond à noir quand elles sont adultes; elle est plus mince et plus petite que la punaise grise du cactus; les stades immatures sont gris sombre avec des zones pâles jaunâtres sur les antennes, le thorax et les pattes (**Figures 6d et 6f**). Le stade adulte des punaises rouges du cactus (*Hesperolabops gelastops* Kirkaldi) a une tête et un prothorax rouge, alors que le reste du corps est cendré avec une bande claire sur le bord du thorax et de l'abdomen (**Figure 6h**); c'est un

petit insecte de 6-8 mm de long. Les insectes nouvellement éclos sont complètement rouges (**Figure 6i**) et ils maintiennent cette couleur en grandissant, ainsi que la bande pale autour de leur corps; seules les ébauches des ailes sont grises (**Figures 6j**). *Chelinidea* et *Narnia* pondent plusieurs œufs côtes à côtes le long des épines des cladodes (**Figure 6**) (Mena Covarrubias, 2013). Au contraire, *Hesperolabops* insère ses œufs sous la couche épidermique du cladode du cactus, avec l'opercule proche de l'épiderme (Palomares Perez, 2011). La période de développement pour les œufs et les stades immatures sont respectivement, de 21 et 56 jours pour *C. tabulata* (Brailovsky et al., 1994); 13 et 67 jours pour *N. femorata* (Vessels et al., 2013); et 269 et 36 jours pour *H. nigriceps* Reuter (Palomares Perez, 2011). Les stades adultes et immatures sont grégaires à différents degrés et ils sont présents dans les vergers de cactus tout au long de l'année; ils bougent au même moment sur les plantes de cactus, cherchant les parties opposées, comme s'ils essayaient de se cacher des observateurs.

Les stades adultes et immatures des punaises suceuses de cactus se nourrissent en perforant les cladodes, les jonctions et les fruits; ils laissent une zone circulaire jaune pâle caractéristique autour de chaque point d'alimentation, par conséquent la zone affectée a une apparence tachetée (**Figure 1e**). Des populations denses peuvent donner une apparence jaune et malade aux cladodes, spécialement dans les vergers nouvellement plantés. Les dégâts de *Narnia* sur les fruits engendrent

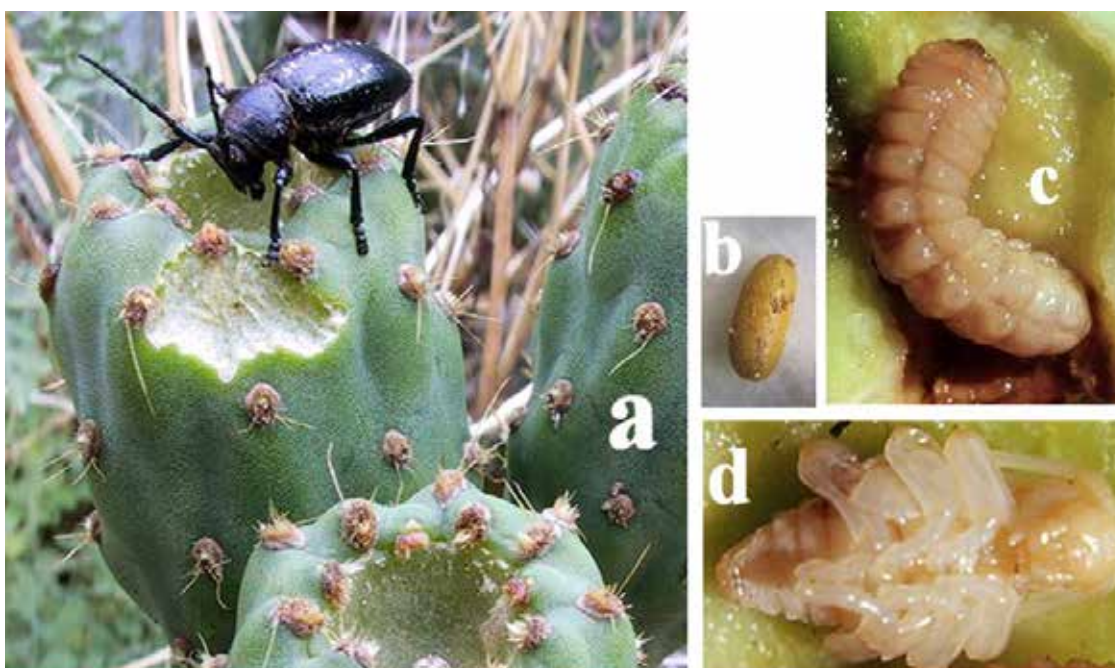


Figure 5
Stades de vie de *Moneilema* :
a) adulte, b) œuf,
c) larve et d) pupa.

une zone spongieuse à chaque point d'alimentation (**Figure 6g**); quand le lieu est moins juteux et sucré, il est petit et superficiel, et une personne ordinaire ne le détecte pas. D'autre part, une grande population de punaises rouges du cactus empêche les tissus externes du fruit d'atteindre leur couleur normale et réduit la teneur en sucre, ce qui affecte le prix du produit. De plus, les punaises rouges du cactus sont associées à la « cacarizo », une maladie qui affecte le cultivar 'Reyna' dans les plateaux mexicains et qui couvre les tissus épidermiques des cladodes de cloques (Palomares Perez, 2011), réduisant considérablement la productivité du verger.

La cible du contrôle pour les punaises suceuses sont les individus adultes et immatures, parce qu'ils se nourrissent depuis l'extérieur; les insectes récemment éclos sont plus sensibles aux agents de contrôle.

Autres insectes ravageurs du cactus

Un petit nombre d'espèces de mouches se nourrissent sur les cactus. *Asphondylia* est la plus importante puisqu'elle se nourrit sur les graines de cactus, alors que *Mayetiola*, *Lonchaea* et *Dasiops* vivent dans les cladodes et font peu de dégâts (Mann, 1969). Les mouches des fruits sont occasionnellement rapportées comme insectes ravageurs à tra-

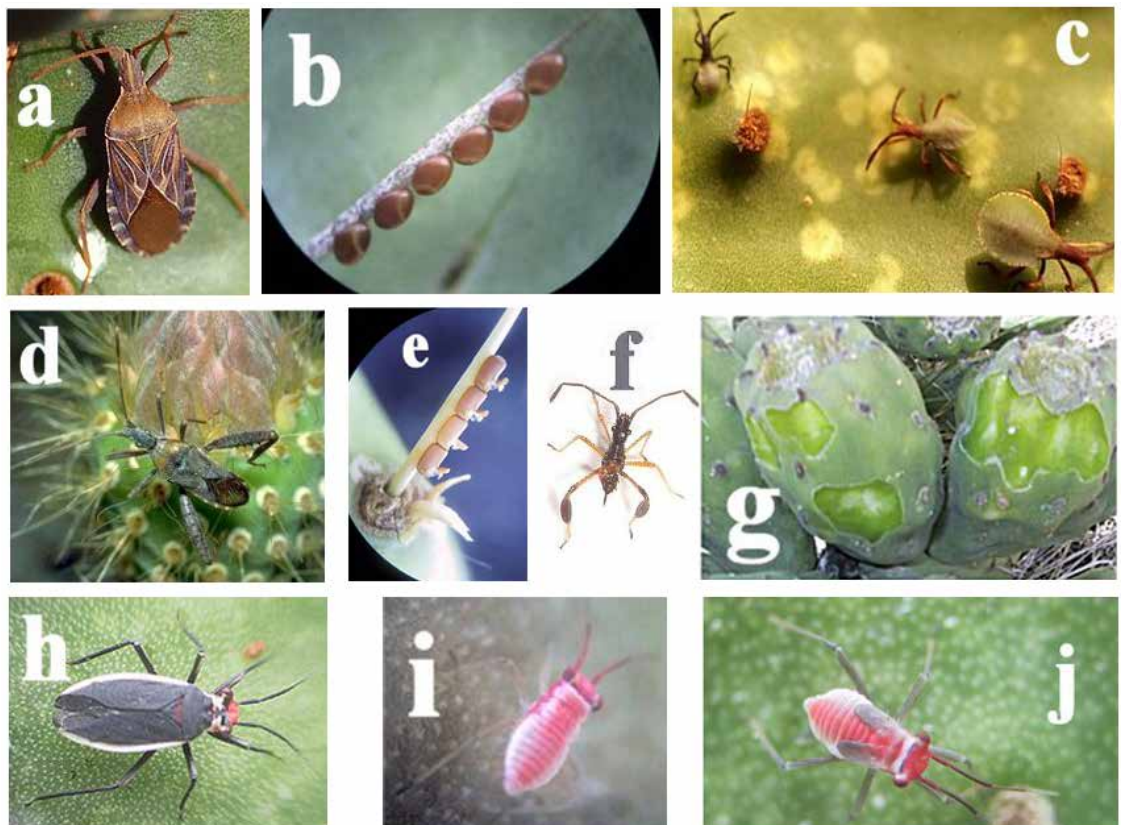
vers le monde, particulièrement dans la zone méditerranéenne (Zimmermann et Granata, 2002). Les thrips se rencontrent communément dans les vergers de figuier de Barbarie, spécialement *Neohydatothrips opuntiae*; ils endommagent la peau des cladodes tendres et les jeunes fruits au début de leur développement. Enfin, les insectes écailles - écaille de cactus (*Diaspis echinocacti*) et la cochenille (*Lepidosaphes* spp.) - se nourrissent à l'extérieur des raquettes; leur présence est limitée à un petit nombre de plantes par verger et ils deviennent importants seulement si leurs ennemis naturels sont détruits avec un insecticide à large spectre.

LUTTE INTÉGRÉE POUR LES INSECTES RAVAGEURS DES CACTUS

La lutte intégrée (LI) est une stratégie pour contrôler les insectes ravageurs en utilisant une large gamme de tactiques de contrôle. De manière à maximiser la réduction de la population de ravageurs, des connaissances approfondies de l'écologie et de la biologie des insectes ravageurs et de leurs ennemis naturels sont nécessaires. Les pratiques clés de la LI dans les vergers de cactus sont décrites ci-dessous :

Figure 6

Stades de vie des punaises suceuses du cactus :
 (a) *Chenilidea tabulata* adulte,
 (b) œufs et
 (c) immatures ;
 (d) *Narnia femorata* adulte,
 (e) œufs, (f) immatures
 et (g) dégâts sur les fruits de cactus ;
 (h) *Hesperolabops gelastops* adulte,
 (i) premier stade et
 (j) stade immature plus vieux



Taille

L'entretien d'un verger inclut la taille annuelle, qui peut affecter la population d'insectes ravageurs de trois manières significatives (Mena Cavarrubias, 2011, 2012) :

- Une canopée dense offre de nombreuses opportunités pour la survie des insectes pendant l'hiver et réduit aussi l'efficacité des pulvérisations. Pour optimiser les bénéfices de la taille, la superposition de cladodes doit être maintenue au minimum.
- La taille fournit en hiver une opportunité de détruire et d'éliminer complètement du verger le charançon des aréoles, le charançon cribleur et la mineuse des cladodes du cactus (*Marmara opuntii* Busck), en même temps que les cladodes d'un an infestés. L'efficacité de cette pratique est améliorée si plusieurs producteurs la réalisent simultanément. Les opuntia sauvages voisins devraient être inclus dans la campagne de taille.
- Pour optimiser les effets positifs de la taille, ne jamais laisser les déchets de taille sur le sol du verger. Ces déchets sont des refuges potentiels pour le développement et la reproduction de cochenilles, de charançons du cactus, de scarabées longicornes et de mineurs des jonctions des raquettes.

Cibler l'émergence

De manière à contrôler les larves nouvellement écloses de lépidoptères ravageurs, il est essentiel de les cibler à l'émergence. Une fois que les larves sont à l'intérieur des tissus du cactus, le contrôle externe est impossible. Il est par conséquent critique de surveiller le stade adulte (papillon de nuit) et d'identifier les pics de population. Une phéromone a été développée pour piéger les papillons mâles nocturnes du cactus (Heath et al., 2006). Les autres espèces de papillon de nuit peuvent être échantillonnées en utilisant des pièges lumineux en septembre-octobre (ver blanc du cactus), avril-juin et septembre-novembre (ver zèbre du cactus) et toute l'année (mineuse des jonctions des raquettes) (Mena Covarrubias, 2011, 2012). Par contre, les stades adultes de *Cactoblastis*, *Olycella* et *Melitara*, ne se nourrissent pas (Mann, 1969) et les pièges à aliments ne peuvent pas être utilisés pour le piégeage ou le suivi.

Piégeage de masse

Il est possible de réaliser des piégeages de masse du charançon du cactus parce que les mâles libèrent une phéromone d'agrégation pour les mâles et les femelles,

spécialement si les pièges sont mis en place sur les cladodes de cactus (Tafoya, 2006). Les charançons du cactus, les scarabées longicornes et les charançons cribleurs sont des scarabées incapables de voler et peuvent être contrôlés par le ramassage à la main, spécialement si la zone infestée est marquée et que l'activité y est concentrée. Pour les scarabées longicornes et les charançons longicornes, le contrôle devrait se faire à l'aube et au crépuscule parce que ce sont des insectes nocturnes; d'autre part, en s'alimentant de cactus, les adultes laissent une empreinte typique (**Figure 1a, 4m, 5a**), et de jour, il est possible d'identifier les plantes touchées la nuit précédente.

Contrôle biologique

Le contrôle biologique est un élément fondamental pour la gestion des insectes ravageurs. Dans le cas des ravageurs du cactus, le contrôle biologique entraîne la conservation des ennemis naturels présents dans le verger qui, à son tour nécessite :

- L'identification des insectes bénéfiques;
- L'apport de sources d'alimentation alternatives pour les stades adultes, spécifiquement des plantes à pollen et à nectar autour du verger;
- Pas de pulvérisation d'insecticides à large spectre (Mena Covarrubias, 2014).

Le contrôle biologique par inondation peut aussi être mis en place en utilisant des champignons entomopathogènes (par exemple : *Beauveria bassiana*) pour contrôler les insectes tels que le ver blanc du cactus (Lozano Gutierrez et Espania Luna, 2008). Le défi est de mettre l'agent de contrôle en contact avec l'insecte cible, parce que la plupart des insectes ravageurs des cactus se nourrissent à l'intérieur et passent la majeure partie de leur cycle de vie à l'intérieur des tissus du cactus.

Contrôle chimique

Seul un nombre limité d'insecticides conventionnels sont autorisés pour le contrôle chimique des plantes de cactus. Cependant, des insecticides biologiques - tels que le pyrèthre, la terre de diatomée, *Bacillus thuringiensis*, le neem et les savons insecticides - sont disponibles et peuvent potentiellement augmenter le spectre des alternatives chimiques pour le contrôle des insectes. Plus de recherches sont nécessaires sur la couverture de la pulvérisation et l'impact de la vitesse des gouttelettes de manière à optimiser le contrôle des ravageurs du cactus.





12

Transformation et utilisation des fruits, des cladodes et des graines

Carmen Sáenz

Département d'Agro-industrie et Œnologie,

Faculté de Sciences Agronomiques, Université du Chili, Santiago, Chili



Transformation et utilisation des fruits, des cladodes et des graines

INTRODUCTION

Un écrivain sicilien a un jour appelé le figuier de Barbarie « un trésor sous les épines » du fait de ses immenses bénéfices, dont certains étaient peu connus avant aujourd'hui.

Dans de nombreux pays - Argentine, Chili, Pérou, Bolivie, Afrique du Sud, Egypte, Turquie, Ethiopie, Erythrée et d'autres pays du bassin Méditerranéen et en Amérique du sud - on consomme traditionnellement la figue de Barbarie. Par contre, au Mexique, en plus des fruits, les cladodes tendres (*nopalitos*) sont consommés. Cependant, les fruits et les *nopalitos* sont périssables et des technologies de transformation sont nécessaires pour augmenter leur durée de vie sur les étalages. De plus, les fruits et les cladodes contiennent de nombreux composants bioactifs qui doivent être préservés pendant la transformation si les consommateurs veulent en tirer tous les bénéfices. La figue de Barbarie est un fruit de multiples usages et une large gamme de produits et de sous produits peuvent en être dérivés. Il en est de même pour les cladodes. Sáenz *et al.* (eds, 2006, 2013) présentent de nombreuses alternatives pour la transformation des fruits et des cladodes. Les avancées récentes dans ce domaine sont exposées dans ce chapitre.

COMPOSITION CHIMIQUE ET COMPOSANTS BIOACTIFS

Avant que la matière première soit transformée, il est essentiel de comprendre sa composition chimique et phytochimique, ainsi que toutes les caractéristiques technologiques en rapport avec la transformation industrielle. Pour le figuier de Barbarie, des informations sont requises sur la

composition chimique des fruits, des graines et des cladodes. De plus, une compréhension approfondie des composants bioactifs de ces parties de cactus, de leurs activités et de leurs relatifs bénéfices pour la santé est nécessaire.

Il y a eu beaucoup de recherches sur la composition chimique des parties comestibles du fruit provenant de plantes ayant poussé dans différents endroits du monde, incluant l'Egypte, l'Arabie Saoudite, le Mexique, le Chili et l'Argentine. Il y a beaucoup d'informations disponibles quant à la composition et les utilisations des graines comme source d'huile, de fibres, et de protéines, en particulier les analyses détaillées de Sáenz *et al.*, eds (2006). Ce chapitre présente les dernières informations sur ce sujet.

Au sein du genre *Opuntia*, l'espèce la plus cultivée est *Opuntia ficus-indica*, caractérisée par des fruits doux et juteux et des pulpes de différentes couleurs: blanche-verte, jaune, orange, rouge ou violette. La proportion de pulpe dans le fruit varie et la peau est généralement fine. Les écotypes colorés (**Figure 1**) ont une application double: la production de colorants naturels (bétalaïnes); et ils confèrent des bénéfices santé grâce à leurs propriétés anti-oxydantes (Butera *et al.*, 2002 ; Galati *et al.*, 2003a ; Kuti, 2004 ; Tesoriere *et al.*, 2005a ; Stinzinger *et al.*, 2005 ; Azeredo, 2009 ; Fernández López *et al.*, 2010).

Les autres composants bioactifs présents dans les fruits sont la vitamine C, les caroténoïdes et les fibres alimentaires (Morales *et al.*, 2009 ; Sáenz *et al.*, 2009, 2012a). Les cladodes de cactus ont une teneur élevée en eau, en fibres alimentaires et en minéraux (Pimienta Barrios, 1990 ; Sáenz *et al.*, eds, 2006). Les graines sont riches en acides gras essentiels polyinsaturés tels que l'acide linoléique (Ennouri *et al.*, 2005 ; Özcan et Al Juhaimi, 2011).

Figure 1
Ecotypes colorés de figues de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*) (variété de jardin, Station expérimentale d'Antumapu, Université du Chili, Santiago) (Photos : C. Sáenz et A.M. Fabry).



TABLEAU 1 Caractéristiques chimiques et technologiques de la pulpe de figue de Barbarie de fruits colorés

Paramètres	Figue de Barbarie verte	Figue de Barbarie violette	Figue de Barbarie jaune-orange
pH	5.3–7.1	5.9–6.2	6.2–6.3
Acidité (% d'acide citrique)	0.01–0.18	0.03–0.04	0.55–0.57
Solides soluble (°Brix)	12–17	12.8–13.2	13.5–14.5
Vitamine C (mg 100 g ⁻¹)	4.6–41.0	20.0–31.5	24.1–28.0
β-carotène (mg 100 g ⁻¹)	0.53	–	0.85–2.28
Lutéine (μg g ⁻¹)	26.0	0.15	0.04
Bétacyanines (mg kg ⁻¹)	0.1–0.8	111.0–431.0	2.4–11.0
Bétaxanthines (mg kg ⁻¹)	0.4–3.1	89.4–195.8	16.0–76.3

Sources : Askar et El Samahy, 1981; Pimienta Barrios, 1990; Sawaya *et al.*, 1983; Sepúlveda et Sáenz, 1990; Sáenz et Sepúlveda, 2001a; Sáenz *et al.*, eds, 2006; Stintzing *et al.*, 2005; Hernández Perez *et al.*, 2009b; Morales *et al.*, 2009; El Gharras *et al.*, 2006; Coria Cayupan *et al.*, 2011; Sáenz et Fabry (données non publiées).

Il y a des variations mineures dans la composition chimique des figues de Barbaries colorées; les différences majeures sont liées à la teneur en pigments. Le **Tableau 1** résume les gammes de certains composés chimiques et de caractéristiques technologiques, basées sur les valeurs rapportées par différents auteurs. Les figues de Barbarie rouges, violettes et jaune-orange contiennent des bêtaïnes, alors que les rouges et violettes contiennent des bétacyanines et les jaune-orange des bétaxanthines (Stintzing *et al.*, 2005 ; Sáenz *et al.*, 2012b).

La composition chimique peut varier en fonction de différents facteurs :

- L'origine des plantes (c'est-à-dire le climat dans lequel elles sont cultivées) ;
- Les facteurs agronomiques, tels que le travail du sol, la fertilisation et l'irrigation ;
- Les différences génétiques (Muñoz de Chavez *et al.*, 1995 ; Ochoa, 2008).

La figue de Barbarie est riche en calcium, bien que McConn et Nakata (2004) rapportent que la biodisponibilité du calcium puisse néanmoins être faible, à cause de sa présence sous forme d'oxalate de calcium, qui n'est pas absorbé. La teneur élevée en potassium et la faible teneur en sodium offrent des bénéfices nutritionnels clairs pour les personnes ayant des problèmes de reins et d'hypertension.

CARACTÉRISTIQUES TECHNOLOGIQUES

Fruit

En plus de la composition chimique et des composants bioactifs, il y a d'autres caractéristiques à considérer pendant la transformation. En général, les figues de Bar-

barie ont un pH élevé (5.3-7.1) et sont par conséquent classées comme aliment à faible acidité (pH ≥ 4.5); *O. xocostle* est une exception avec son acidité plus élevée (pH ≥ 3.5) (Mayorga *et al.*, 1990). On sait bien que les températures de traitements dépendent du pH (Casp et Abril, 1999). Pour cette raison, quand les aliments non acides sont pasteurisés ou mis en conserve, à moins que le pH soit réduit (par addition d'acide citrique, par exemple), une température plus élevée est nécessaire pour réduire la quantité de microbes à des niveaux sûrs en comparaison avec le traitement d'aliments acides (pH ≤ 4.5). De telles températures (généralement > 121°C) peuvent influencer négativement les caractéristiques telles que le goût, la couleur et l'arôme. Le pH et la teneur élevée en solides solubles de la pulpe favorisent la croissance des micro-organismes (Sáenz et Sepúlveda, 1999 ; Sáenz, 2000); par conséquent il est important de contrôler les traitements par la chaleur dans le processus de préservation.

D'un point de vue sensoriel, les fruits verts, dans certains pays (par exemple au Chili), ont meilleure texture, goût (plus sucré) et saveur que les écotypes oranges ou violets, qui tendent à être farineux. Néanmoins, les fruits violets, rouges et oranges ont un grand potentiel pour la transformation parce que les bêtaïnes contenues dans les écotypes de couleur sont plus stables que les chlorophylles, par rapport au pH comme à la chaleur (Merin *et al.*, 1987 ; Montefiori, 1990 ; Castellar *et al.*, 2003 ; Sáenz et Sepúlveda, 2001a ; Sáenz *et al.*, 2012b)

Cladodes

La présence de mucilage et de pectine dans les cladodes influence la viscosité de certains produits, tels que les préparations en poudre mélangées avec de l'eau ou du jus avant la consommation. Les deux composants font partie des fibres alimentaires et sont hydrocol-

loïdes, connus pour leur capacité à absorber et retenir l'eau. Ils peuvent aussi être extraits et utilisés comme épaississants dans les préparations alimentaires (Sáenz *et al.*, 2003, 2004 ; Sepúlveda *et al.*, 2003a, 2007).

La composition chimique des nopalitos a été décrite par Pimienta Barrios (1990) et Maki Díaz *et al.* (2015). Comme pour les autres légumes, il y a une teneur élevée en eau et en fibres. Les polyphénols sont présents et ont une importante activité antioxydante dans l'alimentation; par contre, pendant la conservation, ils peuvent engendrer un brunissement à cause de l'oxydation (Rodríguez Felix, 2002). De plus, l'acidité des nopalitos varie pendant la journée - du fait du métabolisme acide crassulacéen (CAM) (Cantwell *et al.*, 1992) - et le moment optimal de récolte doit être choisi en fonction de la transformation qui va être appliquée.

Graines

Les graines représentent environ 15% de la partie comestible des fruits et elles ont une teneur variable en huile (en moyenne, 9.8 g 100 g⁻¹ de graines) (Ramadan et Mörsel, 2003a).

L'huile de graines est riche en acides gras insaturés (Sepúlveda et Sáenz, 1988 ; Ennouri *et al.*, 2005 ; Ghazi *et al.*, 2013); par conséquent, elle est intéressante pour les industries pharmaceutiques et cosmétiques, par exemple, au Maroc et en Tunisie. Etant donné le faible rendement en huile des graines, elle n'est ni économique ni attractive en tant qu'huile de consommation. La présence de tocophérol, reconnu comme anti-oxydant naturel, varie de 3.9 à 50%. Matthäus et Özcan (2011) et Özcan et Al Juhaimi (2011) rapportent que les fibres et les minéraux sont aussi des composants importants des graines, avec 12.5% de fibres brutes et des quantités élevées de calcium, potassium et phosphore, parmi d'autres minéraux. La teneur relativement élevée en protéines (approximativement 6%) signifie que les graines de figuier de Barbarie sont une source de protéines pour la consommation humaine (Tlili *et al.*, 2011).

TECHNOLOGIES DE TRANSFORMATION

Une large gamme de technologies de conservation traditionnelles peuvent être appliquées aux figues de Barbarie, aux cladodes de cactus et aux graines. Certaines technologies sont décrites par Sáenz *et al.*, eds (2006) et quelques-unes des plus innovantes sont décrites ci-dessous.

Produits déshydratés

L'activité de l'eau (aw) est une mesure de « l'eau disponible » dans un aliment. La disponibilité de l'eau dans les tissus d'une plante est variable et une distinction est

faite entre « l'eau libre » et « l'eau liée ». Les proportions d'eau libre et liée dépendent principalement de la composition de l'aliment, puisque des composants tels que les hydrocolloïdes ont une capacité de rétention de l'eau très élevée. Le mucilage présent dans les raquettes et les fruits d'*Opuntia* est un exemple d'hydrocolloïdes.

La croissance microbienne peut être contrôlée en abaissant l'aw. L'aw minimum pour la croissance microbienne est variable. Selon Roos (2007), elle est supérieure à 0.90 pour les bactéries, entre 0.87 et 0.90 pour les levures, entre 0.80 et 0.87 pour les moisissures et entre 0.60 et 0.65 pour les levures osmophiles.

Les technologies utilisées pour réduire l'aw pour conserver les aliments incluent la déshydratation, la concentration et la lyophilisation (séchage de produits congelés); la dernière combine le froid avec la diminution de l'aw pour contrôler la croissance des microorganismes.

Produits déshydratés de figuiers de Barbarie

La déshydratation est l'un des plus vieux procédés de conservation des aliments. Elle peut être faite naturellement - séchage solaire - ou avec des équipements tels que des tunnels de déshydratation, des colonnes de déshydratation, des séchoirs et des atomiseurs. Des procédés très contrôlés ont été récemment développés pour produire des produits séchés de meilleure qualité et plus homogènes.

En ce qui concerne le figuier de Barbarie, il y a eu diverses études sur la déshydratation de fines lamelles de pulpe pour préparer des produits naturels à croquer. Ils sont connus comme « feuilles de fruit », « cuir de fruit », « barres de fruit » ou « rouleau de fruit » et varient en épaisseur et en teneur en eau: les feuilles sont plus fines et ont une faible humidité, alors que les barres ont une forte teneur en eau ($\leq 20\%$). L'Université du Chili a développé un procédé par lequel un mélange de pulpe de figue de Barbarie et de pulpe de coing ou de pomme est utilisé pour préparer les rouleaux de fruits. Les écotypes colorés sont aussi utilisés pour fabriquer un produit avec un goût et une texture plaisants et une apparence attrayante (Sepúlveda *et al.*, 2000, 2003b) (**Figure 3**). Le **Tableau 2** montre les caractéristiques principales de certains produits. Tous les traitements contiennent :

- 75% de pulpe de figue de Barbarie;
- 25% de pulpe de pomme;
- Une quantité variable de sucrose (T1 et T2 = 6% et T3 = 0% de sucrose et 0.01% de sucralose);
- Une quantité variable de graines de lin (T1 = 0% et T2 et T3 = 1%).

La teneur totale en fibres alimentaires des traitements est de 14.1 à 43.9% ; l'écotype violet a une teneur



TABLEAU 2 Fibres alimentaires et composants phénoliques totaux dans des rouleaux de figue de Barbarie colorée mélangée avec de la pulpe de pomme et des graines de lin

Paramètre/Traitement	Rouleaux de pulpe de figue de Barbarie jaune-orange		
	T1	T2	T3
Fibres alimentaires totaux (g 100 g ⁻¹)	14.1 a	24.3 b	38.8 c
Phénoliques totaux (mg EAG kg ⁻¹)	1 445.3 a	1 365.0 a	1 640.1 b
	Rouleaux de pulpe de figue de Barbarie violette		
	T1	T2	T3
Fibres alimentaires totaux (g 100 g ⁻¹)	20.2 a	28.9 b	43.9 c
Phénoliques totaux (mg EAG kg ⁻¹)	1 404.7 a	1 438.0 b	1 846.0 b

^a EAG = Equivalent acide gallique .

Les moyennes suivies par des lettres différentes diffèrent à P < 0.05.

Source: Sáenz *et al.*, données non publiées

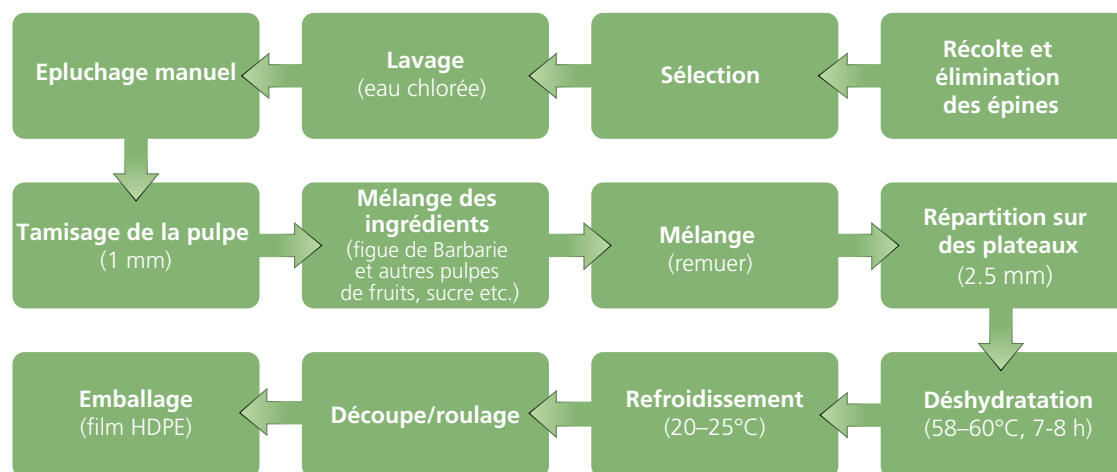


Figure 2
Préparation des rouleaux de figue de Barbarie (adapté de Sáenz *et al.*, eds, 2006)

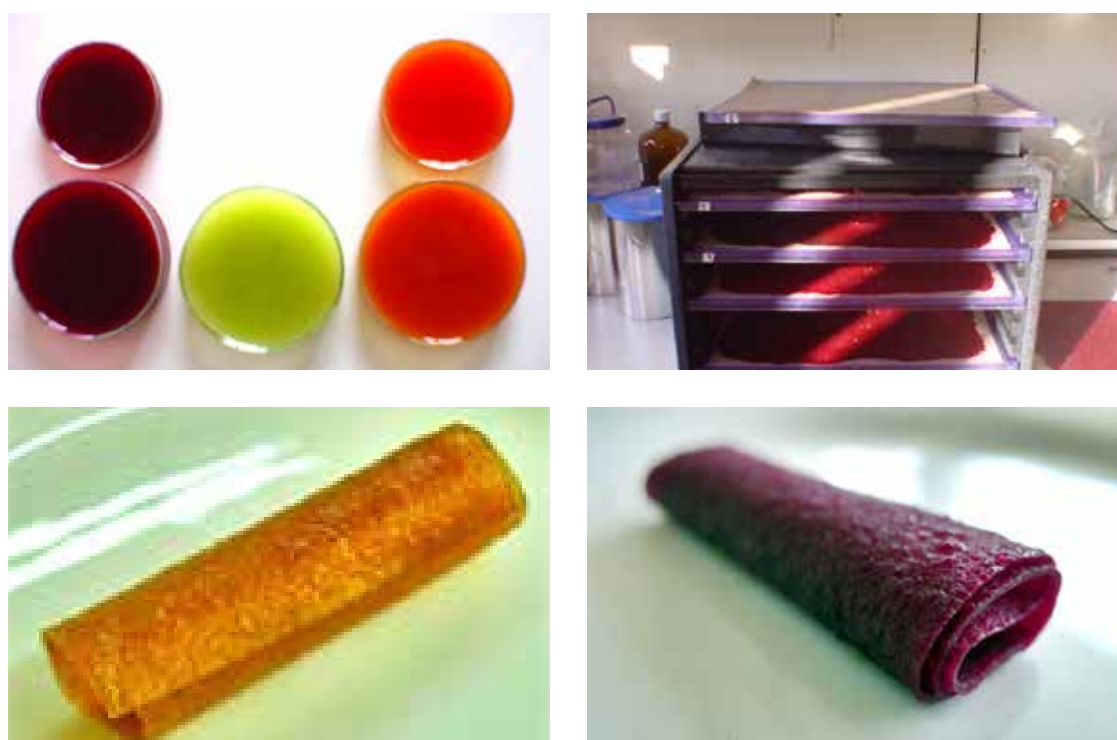


Figure 3
Pulpes de figue de Barbarie et de pomme ; séchoir électrique à plateaux ; rouleaux d'écotypes colorés (Photos : C. Sáenz et A.M. Fabry)

élevée en fibre grâce à sa forte teneur en pulpe, et du sucralose (à la place du sucre) est ajouté.

L'organigramme de la **Figure 2** présente les différentes étapes nécessaires dans la production de feuilles de figues de Barbarie et la **Figure 3** montre la pulpe de figue de Barbarie et celle de pomme, ainsi qu'un four de séchage utilisé pour fabriquer les feuilles.

El Sahamy *et al.* (2007a) ont préparé des feuilles de figue de Barbarie orange-jaune; ils ont testé différentes températures de séchage (60 et 70°C) et une gamme de ratios de sucrose (0, 1, 2, 3, 4, 5 et 10%). Les pulpes préparées ont été étalées pour obtenir une épaisseur de 10 mm et déshydratées dans un four à convection pendant 44 heures. Les feuilles qui ont eu le plus de succès étaient celles préparées avec 2 et 3% de sucrose.

Les produits déshydratés ne contiennent généralement pas d'additifs; par conséquent ce sont des « produits naturels », acceptés par les consommateurs parce qu'ils sont considérés comme sûrs.

Cette technologie simple, à la connaissance de l'auteur, n'a pas été utilisée au niveau commercial. Bien que des entreprises proposent des rouleaux de pomme, de fraise, de cerise ou d'abricot, ces produits ne sont généralement pas 100% naturels et sont typiquement faits avec de la purée de poire concentrée et des colorants et arômes artificiels.

La qualité de tels produits pourrait être facilement améliorée en utilisant de la pulpe colorée de figue de Barbarie pour préparer un produit plus naturel et plus sain.

Produits de cladodes déshydratés

Les options de déshydratation pour les cladodes sont différentes de celles pour les figues de Barbarie. Les cladodes ne sont pas déshydratés pour la consommation directe, mais sont transformés en poudres (Sáenz *et al.*, 2010) d'une teneur élevée en fibres alimentaires. Cette poudre peut être utilisée pour préparer des biscuits (en la mélangeant avec de la farine de blé), des desserts et - dans certains pays, en particulier le Mexique - des céréales pour le petit-déjeuner ou des tortillas. Elle peut aussi être utilisée dans la production de compléments alimentaires (comprimés, tablettes etc.).

Rodríguez García *et al.*, (2007) ont observé que pendant le développement des jeunes cladodes, les fibres insolubles augmentent (de 29.87% dans un cladode de 60 g à 41.65% dans un cladode de 200 g), alors que les fibres solubles diminuent (de 25.22 à 14.91%, respectivement). Ayadi *et al.* (2009) ont préparé de la poudre en utilisant des raquettes de cactus de 2 et 3 ans; les fibres alimentaires totales étaient de 51.24%, dont 34.58% de fibres insolubles et 12.98% de fibres solubles.

Cette poudre peut contribuer à la valeur nutritionnelle

de divers aliments en augmentant la consommation journalière de fibres alimentaires. Cependant, l'incorporation de la poudre dans des aliments implique certains défis technologiques puisque certains aspects de goût et de texture nécessitent une amélioration (Sáenz *et al.*, 2002b, c ; Ayadi *et al.*, 2009). Par exemple, les traitements par la chaleur engendrent un arôme et une saveur herbacée et le mucilage présent dans les cladodes produit des défauts de texture (Sáenz *et al.*, 2012a). Les recherches de Sáenz *et al.*, (2012a) ont conduit à une fibre alimentaire naturelle purifiée avec plus de 80 g 100 g⁻¹ de fibre alimentaire totale et 20-22 g 100 g⁻¹ de fibre alimentaire soluble, un des types les plus rares de fibre présent dans les légumes. La purification donne lieu à une augmentation des fibres alimentaires totales, une diminution de la couleur verte de la poudre et une diminution du total des composants phénoliques, en particulier quand les cladodes sont lavés à des températures élevées.

Ce processus de purification est prometteur et pourrait engendrer une plus grande utilisation de la poudre de cladodes de cactus comme additif alimentaire, spécialement sur les marchés où les consommateurs ne sont pas familiers au goût herbacé des cladodes de cactus et par conséquent y sont moins tolérants. La poursuite de la recherche est nécessaire pour obtenir une poudre riche en fibres alimentaires, avec peu de goût et peu de couleur et avec une capacité antioxydante élevée pour l'utilisation comme nouvel ingrédient dans les formules de nouveaux aliments.

Concentrés de figue de Barbarie

La gamme de produits concentrés dérivés des figues de Barbarie inclue les sirops, les confitures et les jus concentrés (Sáenz, 2000). Morales *et al.* (2009) ont développé des sauces à dessert (nappages) à partir d'écotypes colorés avec d'excellents résultats, préservant leur couleur attrayante et leurs composants fonctionnels. La concentration par le vide a été utilisée sur des mélanges de pulpe de figue de Barbarie avec du sucre (22.0-30.25%), du sirop de fructose (13.75-22.0%), du glucose (11.0-19.25%), de l'acide citrique (0.14%) et de l'amidon modifié (1.5%). Ces produits attractifs peuvent être utilisés dans une gamme de plats différents (**Figure 4**). Le **Tableau 3** liste les composants bioactifs présents dans deux *nappages* colorés.

Une grande variété d'aliments à base de figue de Barbarie sont issus de transformation (Sáenz *et al.*, eds, 2006). Les entreprises utilisent l'internet pour communiquer sur les différentes manières de consommer et apprécier les produits de figues de Barbarie, offrant des produits concentrés, tels que les confitures, les sirops et les bonbons. Les informations disponibles en ligne suggèrent que ceux-ci sont principalement artisanaux et de petites entreprises.

Pâte de fruit de figue de Barbarie

Des recherches par le Groupe d'Auteur à l'Université du Chili ont récemment mené au développement de pâtes de fruit de figue de Barbarie en utilisant la pulpe de différents écotypes colorés pour exploiter les pigments attractifs (Sáenz et Fabry, données non publiées). Ces produits - obtenus par évaporation de la pulpe et l'addition de gélifiants tels que la pectine - se sont révélés très populaires chez les petits exploitants dans les zones arides du Chili, où il y a des pénuries, non seulement d'eau mais aussi d'électricité. Ces pâtes de fruit sont fabriquées avec les technologies disponibles, permettant aux petits exploitants d'ajouter de la valeur à leur production de figue de Barbarie. L'organigramme de la **Figure 5** montre les différentes étapes de la production de pâtes de fruit à partir de figues de Barbarie.

Ces pâtes de fruit de figue de Barbarie sont fabriquées avec :

- De la pulpe de figue de Barbarie sans pépins (1000 g) ;
- Du sucre (760 g) ;
- De la pectine (52 g) - un autre gélifiant (par exemple la carboxyméthylcellulose - CMC)



Figure 4

Nappage de figue de Barbarie coloré sur un dessert laitier.
(Photos : C. Sáenz et M. Morales)

pourrait être testé, ou un mélange de pulpes de fruits riches en pectine (par exemple le coing);

- De l'acide citrique (16 g) - ou remplacé par du jus de citron.

La **Figure 6** montre les pâtes de fruit de figue de Barbarie fabriquées par des petits exploitants dans le village de Codpa (Arica et Parinacota, Chili) dans un atelier proposé par notre groupe. Le village est situé à Camarones, au milieu du désert de Tarapacá dans le nord du Chili - une zone avec des restrictions d'eau et d'électricité et où le figuier de Barbarie est cultivé comme culture alternative.

Récemment, Sáenz et Fabry (données non publiées) ont développé des préparations gela-

TABLEAU 3 Composants bioactifs dans les nappages de figues de Barbarie colorées

Composant bioactif	Nappage de figue de Barbarie violette	Nappage de figue de Barbarie jaune-orange
Caroténoïdes ($\mu\text{g g}^{-1}$)	0.186 ± 0.001	0.021 ± 0.001
Phénoliques totaux (mg EAG litre^{-1}) ^a	350.50 ± 15.25	131.48 ± 5.72
Bétalaïnes	81.06 ± 1.83	63.80 ± 1.86
Bétacyanines (EB mg kg^{-1}) ^b	66.09 ± 1.03	0.92 ± 0.00
Bétaxanthines (EI mg kg^{-1}) ^c	14.97 ± 1.53	62.88 ± 1.86

^a EAG : équivalent acide Gallique ; ^b EB : équivalent bétanine ; ^c EI : équivalent indicaxanthine (Morales et al., 2009).

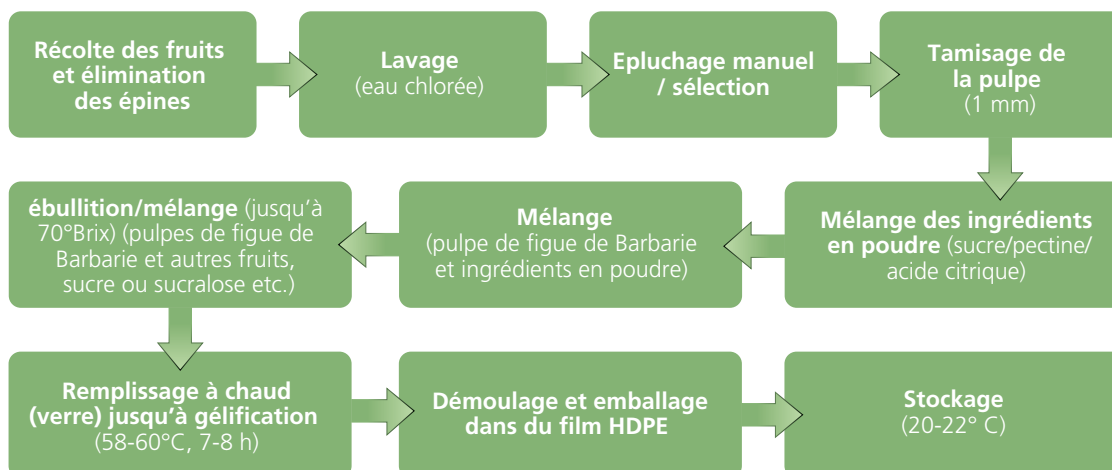


Figure 5

Préparation de pâtes de fruit de figue de Barbarie

tineuses de pulpe de figue de Barbarie, en mélangeant de la pulpe fine tamisée (2.5 litres) avec de la gélatine sans goût (0.45 kg), de l'eau (2 litres) et du sucre (1.5 kg) (**Figure 7**).

Le produit final a une apparence brillante et attrayante (**Figure 8**) et une acceptation sensorielle élevée. Les paramètres de couleur de la préparation de la gélatine violette sont $L = 5.6$, $a^* = 30.0$, $b^* = 9.0$, $C^* = 31.3$ et $hab = 16.6$, correspondant à une couleur violet foncé. Malgré la teneur en solides solubles de 56.5° Brix, le produit montre une aw élevée (0.92). Pour cette raison, afin d'assurer une bonne durée de vie, l'utilisation de conservateurs (par exemple : le benzoate de sodium et le sorbate de potassium) est recommandée.

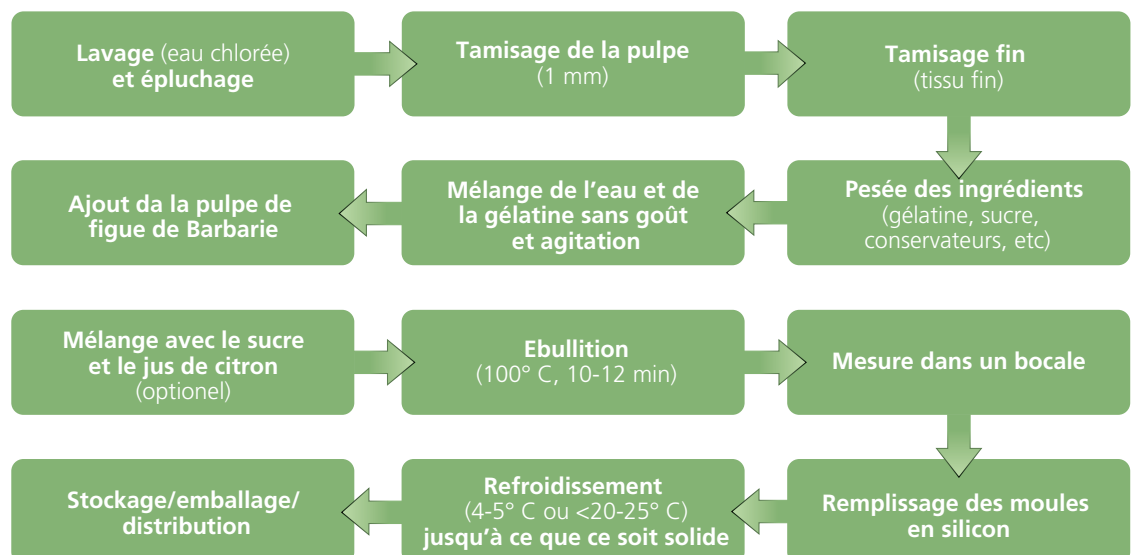
Confitures de Nopal

La préparation de confitures combine les traitements par la chaleur avec une diminution de l' aw (et parfois aussi du pH pour permettre un traitement thermique moins sévère). Il y a différentes confitures et sirops sur le marché dans plusieurs pays (Sáenz *et al.*, eds, 2006). Un produit innovant, pour lequel la technologie a récemment été transmise aux petits producteurs dans le nord du Chili, est la confiture de cladode et citron : la confiture de nopal. Pour enlever l'excès de mucilage affectant la texture, les cladodes sont prétraités avec du $Ca(OH)_2$. Ce prétraitement peut être évité si les cladodes ont une faible teneur en mucilage. L'or-

Figure 6
Pâtes de fruits de figues de Barbarie colorées faites dans un atelier dans le nord du Chili (Photos : C. Sáenz et A. M. Fabry)



Figure 7
Préparation des gelées de figues de Barbarie



ganigramme de la **Figure 9** décrit les étapes impliquées dans la préparation des confitures de nopal.

La confiture de nopal représente une nouvelle alternative pour transformer les cladodes. La confiture peut être consommée avec des crackers et des produits de boulangerie, ou servie avec de la viande et d'autres plats (**Figure 10**).

Jus de figue de Barbarie

La pasteurisation du jus de figue de Barbarie fait avec des fruits verts a donné des résultats insatisfaisants, à cause de la couleur déplaisante et du changement d'arôme qui se produit pendant le processus. Par contre, le jus de figue de Barbarie violette mélangé avec d'autres jus (par exemple : d'ananas) peut représenter une alternative intéressante (Sáenz et Sepúlveda, 2001a). Cependant, l'acidité est un problème potentiel: l'addition d'acides organiques, pour augmenter l'acidité, facilite les processus de chauffage mais peut modifier le goût, alors que les consommateurs préfèrent généralement les jus de figue de Barbarie avec l'acidité originale du fruit, similaire à celle du fruit frais (Sáenz et Sepúlveda, 1999). El Samahy



Figure 8
Préparations gélatineuses faites de figues de Barbarie violettes, de figues de Barbarie jaune-orange et un mélange des deux (Photos : C. Sáenz et A. M. Fabry)

et al. (2007a) ont étudié la production de jus de figue de Barbarie stérilisés et pasteurisés, en ajustant le pH et en ajoutant des conservateurs dans certains traitements (benzoate de sodium). Des changements de couleur étaient observés à température élevée, mais la stabilité microbiologique était atteinte pour tous les traitements. Baccouche et al. (2013) ont produit différentes formulations de boissons de figues de Barbarie faites avec du petit-lait; elles étaient pasteurisées à 80°C pendant 20 minutes, et la stabilité physique a été

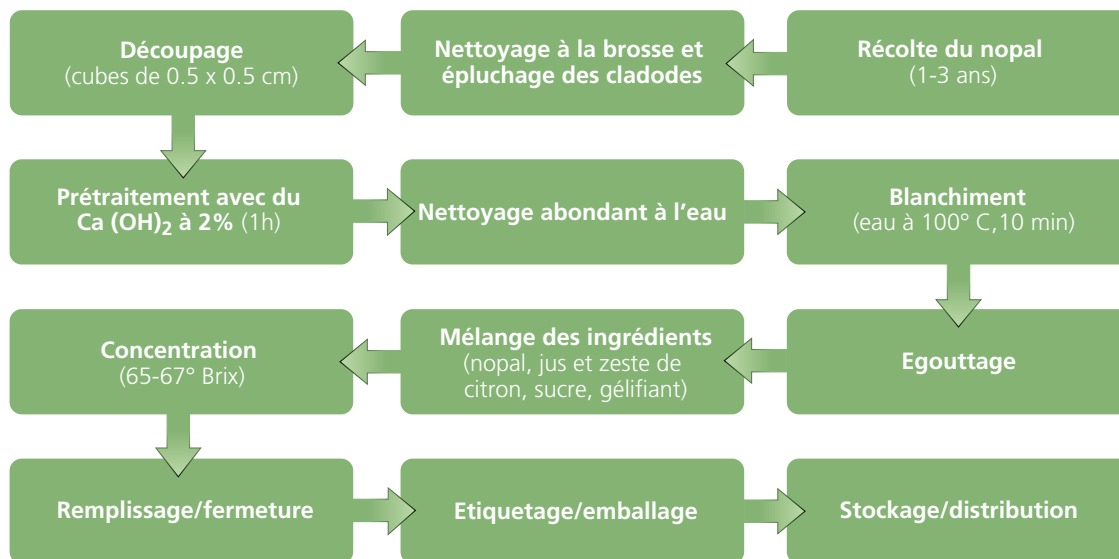


Figure 9
Préparation de la confiture de nopal (cladode et citron) (modifié de Sáenz et al., eds, 2006)



Figure 10
Confiture de cladode et citron (Photos : C. Sáenz et A.M. Fabry)

évaluée après 40 jours à 5°C. Les auteurs ont observé une augmentation de la sédimentation et de la turbidité (Unité de Turbidité Néphélométrique - UTN) pendant le stockage et une diminution de la couleur, probablement due à la réaction de Maillard.

De Wit *et al.* (2014) ont fait des jus à partir de 8 cultivars de figuiers de Barbarie, avec différentes couleurs de fruit: un cultivar d'*O. robusta* ('Robusta', violet) et sept cultivars d'*O. ficus-indica* ('Berg' x 'Mexican', rose ; 'Fuscaulis', vert-blanc ; 'Meyers', rouge ; 'Algerian', rouge ; 'Santa Rosa', orange ; 'Skinners Court', vert-blanc ; 'Morado', blanc). Les jus ont été pasteurisés (60°C pendant 10 minutes). Les auteurs ont rapporté que le traitement par la chaleur avait un effet défavorable sur le goût du jus et, pour certains des cultivars (c'est-à-dire 'Santa Rosa'), la pasteurisation faisait que le goût de figue de Barbarie et de melon des jus frais devenait amer et astringent.

Un exemple de produit commercial est une boisson faite de concentré de figues de Barbarie colorées, d'eau et d'arômes naturels. Ce produit est disponible sur le marché Etats-Unien, emballé dans des Terta Pak d'un litre et vendu approximativement à 6\$ US par litre.

Jus et nectars de cladodes

Rodríguez (1999) a rapporté différentes formulations de boissons faites à partir de cladodes tendres, qui ont été blanchis à 95°C, liquéfiés et filtrés. Pour de meilleurs résultats, le liquide a été dilué à 30% avec de l'eau, le pH a été ajusté avec de l'acide citrique (pour atteindre un pH de 3.5) et de l'aspartame a été utilisé comme adoucissant (1 g 335 ml⁻¹). Le produit a été pasteurisé à 76°C pendant 15.2 minutes, avec une perte moyenne d'éléments sensibles à la chaleur et d'autres composants.

Ces dernières années ont vu une augmentation de l'approvisionnement en jus et en nectars de cladodes, principalement vendus au Mexique. Le procédé pour obtenir le jus de raquette de cactus se déroule comme suit :

- Retirer les épines des cladodes.
- Les découper.
- Les broyer en utilisant des équipements industriels ou domestiques (mixeur).
- Ajouter de l'eau pour faciliter le procédé.
- Filtrer le liquide pour en séparer les solides.

Le jus de cladodes est produit au Mexique par plusieurs entreprises et des jus mixtes sont aussi fabriqués en combinant des cladodes avec de l'orange, de l'ananas, de la goyave ou du céleri; les jus sont disponibles sur le marché local et pour l'exportation. Un autre produit vendu sur le marché mexicain est « l'eau de nopal », une boisson faite avec du jus de cladodes de cactus et

du sucre, produite généralement à petite échelle. Les autres produits incluent les sirops de cladode, fabriqués à partir d'une base de sirop de sucrose (55-75° Brix) avec l'addition de jus de cladode. Au Texas (Etats-Unis d'Amérique), une entreprise produit des sirops de mûre et de myrtille avec ajout de mucilage de cactus.

Nopalitos en conserve (cladodes tendres)

Les technologies de mise en conserve et de pasteurisation sont largement adoptées dans les entreprises de productions de divers produits à base de *nopalitos*. Au Mexique, par exemple, des cladodes tendres (*nopalitos*) conservés dans une saumure ou dans le vinaigre sont disponibles sur les marchés depuis de nombreuses années (Corrales García et Flores Valdez, 2003). Des descriptions détaillées de la préparation de *nopalitos* vinaigrés et de *nopalitos* saumurés, parmi d'autres, sont données par Sáenz *et al.*, eds (2006).

Produits congelés

La congélation est largement adoptée pour la conservation des aliments. Plus que toute autre méthode, la congélation permet la préservation du goût, de la texture et des caractéristiques fonctionnelles et nutritionnelles. Les techniques telles que les tunnels à air froid (-40°C) ou la pulvérisation d'azote liquide (-196°C), sont largement utilisées dans l'agro-industrie pour améliorer la qualité du produit final. Plus la congélation est rapide, plus les cristaux de glace formés sont petits et meilleure est la qualité des produits. La congélation combine les effets des faibles températures (les microorganismes ne peuvent pas croître, les réactions chimiques sont réduites et les réactions métaboliques cellulaires sont retardées) avec une diminution de l'activité de l'eau (*aw*) (Casp et Abril, 1999 ; Vieira, 1996 ; Delgado et Sun, 2000). Cependant, les expériences sur les figues de Barbarie n'ont pas encore donné de bons résultats (Sáenz *et al.*, eds, 2006). Plusieurs études indiquent que les technologies de congélation pourraient donner de meilleurs résultats avec de la pulpe de figue de Barbarie à la place du fruit entier, coupé en deux ou en tranches. La décongélation - quel que soit le type de découpe (entière, moitiés ou tranches) - présente quelques problèmes, avec le l'écoulement de l'excès de mucilage après la décongélation, donnant une apparence déplaisante. Cela se produit même quand les technologies de Surgélation Individuelle Rapide (IQF) sont adoptées, impliquant des températures de surgélation proches de -40°C.

Dans très peu de pays, on peut trouver les glaces fabriquées à partir de pulpes de figues de Barbarie colorées et celles-ci peuvent être une alternative intéressante pour l'utilisation de pulpes ou de concentrés. El Samahy *et al.* (2009) ont étudié les glaces additionnées



de concentré de pulpe de figue de Barbarie rouge (30° Brix) ; un ajout de 5% de pulpe a été le plus acceptable. Le Groupe de Recherche d'Auteur est actuellement en train de conduire des expérimentations sur cet attractif produit.

AUTRES TECHNOLOGIES

Fermentation

La fermentation est une des plus vieilles techniques de conservation des aliments et elle a été utilisée pour les figues de Barbarie pour obtenir divers produits. *O. streptacantha* (figuier de Barbarie 'Cardona') a été utilisé pour produire des boissons alcoolisées au Mexique depuis la période préhispanique; la boisson la plus traditionnelle faite avec le jus de cette espèce est le *colonche* (Corrales García et Flores Valdez, 2003 ; Diaz, 2003).

Flores (1992) a expérimenté avec *O. streptacantha* et *O. robusta* la fabrication de vin et d'un alcool distillé. Un vin de 11.6° GL a été obtenu à partir d'un jus concentré (20° Brix) en utilisant *O. streptacantha*; l'alcool distillé a atteint 56.2° GL. Les deux espèces *O. streptacantha* et *O. robusta*, ont produit un alcool avec des caractéristiques similaires et un arôme fruité plaisant.

Un autre produit ayant un potentiel intéressant est le vinaigre et quelques expériences de fabrication sont dignes d'intérêt. Pérez *et al.* (1999) ont préparé un vinaigre à partir de figues de Barbarie oranges en utilisant deux types de substrats pour la fermentation acétique: un jus ayant préalablement subi une fermentation alcoolique (13.5°GL) et un jus de figue de Barbarie avec du sucre ajouté (22°C). *Acetobacter pasteurianus* a été utilisée dans le premier cas et *Acetobacter xylinum* dans le second. Les deux vinaigres obtenus présentaient une couleur jaune-ambré intense, nette et claire, avec une odeur fraîche d'acide acétique.

Prieto *et al.* (2009) ont étudié le développement de vinaigres de type balsamique à partir de jus de figuier de Barbarie coloré ; les produits en résultant avaient une couleur attractive, un arôme plaisant et une bonne acceptabilité sensorielle (**Figure 11**).

Technologies de séparation membranaire

Les technologies de séparation membranaire ont été de plus en plus utilisées dans l'agro-industrie au cours de 25 dernières années. Aujourd'hui, leur utilisation est très répandue et adoptée pour une gamme d'utilisation incluant la pasteurisation à froid, la clarification de jus et la concentration de

composants bioactifs (Cissé *et al.*, 2011 ; Rai *et al.*, 2006 ; Todisco *et al.*, 2002). Les technologies de membrane ont des avantages sur les autres technologies de séparation (filtration traditionnelle et concentration) :

- Les opérations se font à faible température (15-35°C) - par conséquent elles sont économiques (faible consommation d'énergie) et la dégradation des composants sensibles à la chaleur est évitée.
- Il n'y a pas d'utilisation de produits chimiques (enzymes ou aides à la filtration) - contrairement à la filtration ou à la séparation traditionnelle (Cassano *et al.*, 2010).

Dans les technologies de séparation membranaire, la membrane (en céramique ou polymère) agit comme barrière: elle laisse passer seulement certains composants du mélange et retient les autres. Le flux de ces substances est déterminé par diverses forces directrices, à savoir la pression, la concentration et le potentiel électrique. Cette sélectivité signifie par exemple qu'il est possible d'enrichir un flux avec une substance, voire plus, présente dans le flux d'alimentation. Deux flux émergent du flux d'alimentation: le perméat (ou filtrat) et le rétentat (ou concentré). Le rétentat contient des substances qui ne franchissent pas la membrane, alors que le perméat est riche en substances qui la traversent (Raventós, 2005). La sélectivité dépend de la taille des pores de la membrane et de l'affinité chimique entre la membrane et les substances (Cheryan, 1998 ; Raventós, 2005).

Les processus de la technologie de membrane utilisés dans l'agro-industrie incluent: la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (OI). Cette dernière est connue pour son efficacité pour dessaler l'eau de mer. Des recherches initiales sur le jus de figue de Barbarie se sont concentrées sur l'application de la MF et de l'UF - les méthodes normalement utilisées pour la clarification des jus. Cassano *et al.* (2007) ont expérimenté avec la figue de Barbarie



Figure 11
Vinaigres de type Balsamique à partir de jus de figues de Barbarie colorées
(Photo : C. Sáenz)

cv. 'Gialla' (jaune-orange) et ont combiné les technologies membranaires avec la concentration par distillation osmotique (DO); ils ont utilisé des températures faibles et ont préservé les caractéristiques organoleptiques, nutritionnelles et sensorielles du jus de figue de Barbarie. Le procédé de concentration (DO) a donné un jus à 61° Brix et un bon équilibre de bétalaïnes.

Cassano *et al.* (2010) ont plus tard comparé les performances de la MF et de l'UF sur la composition physico-chimique des jus de figues de Barbarie jaunes. Pour les deux procédés, les solides suspendus dans le jus frais ont été totalement éliminés et un jus clarifié a été obtenu, et les bétacyanines ont été retenues. Ce rétentat, riche en bétalaïnes, pouvait être pasteurisé et ajouté à un jus concentré pour préparer, par exemple, des jus avec pulpe, des glaces, des gelées ou des formules pour enfant (Cassano *et al.*, 2010).

Le Groupe de Recherche de l'Auteur de ce chapitre a récemment utilisé cette technologie pour séparer ou concentrer les bétalaïnes de figue de Barbarie violettes par MF, UF et NF (Cancino, Robert et Sáenz, données non publiées). Grâce à l'évitement des hautes températures, il n'y a pas eu de dégradation des pigments, et les extraits de bétalaïne obtenus étaient indemnes de mucilage et avaient une teneur réduite en sucres à faible poids moléculaire. Le **Tableau 4** montre les caractéristiques de la pulpe de figue de Barbarie violette: prédiluée (P), ultrafiltrée (UF) et nanofiltrée (NF). Les extraits ultrafiltrés et nanofiltrés étaient, comme attendu, des solutions totalement clarifiées (0 UTN), en comparaison avec la pulpe prédiluée (2 453 UTN) qui contenait du mucilage. Pour l'UF, la teneur en bétacyanine (247.9 mg EB litre⁻¹) était similaire à celle de la P; cependant, pour la NF, les valeurs de bétacyanine (216.3 mg EB litre⁻¹) étaient plus faibles que celles de la P et de l'UF, prenant en considération que la pulpe (flux d'alimentation) est diluée.

Cassano *et al.* (2010) ont obtenu les valeurs les plus élevées de bétalaïne avec l'UF (32.8 mg EB litre⁻¹). La teneur en polyphénols était concentrée par les deux procédés membranaires (UF et NF). Cassano *et al.* (2010) - appliquant l'UF à la figue de Barbarie cv. 'Gialla' et utilisant d'autres membranes et conditions de procédé - ont rapporté des valeurs plus faibles de polyphénols totaux (552.17 mg EAG litre⁻¹). Les résultats obtenus pour les différents extraits (P, UF et NF) sont dus à la taille des pores de la membrane, ainsi qu'aux affinités chimiques entre la membrane et l'interaction entre les différents composés et la membrane.

Ces types de produits offrent de nouvelles possibilités pour la production de colorants à base de figue de Barbarie. Cependant, plus de recherches sont nécessaires pour améliorer la concentration des pigments et les autres propriétés des extraits.

AUTRES PRODUITS

Colorants de figue de Barbarie

Les colorants naturels - en particulier, rouges et violet - sont grandement appréciés par les consommateurs puisque les colorants rouges synthétiques utilisés comme additifs dans les aliments ont été limités par des réglementations officielles dans l'Union Européenne et les Etats-Unis d'Amérique à cause des possibles effets indésirables sur la santé humaine (Tsuda *et al.*, 2001). Par conséquent, il y a un intérêt croissant pour de nouvelles sources de pigment rouge naturel et leurs applications potentielles en alimentation.

Les écotypes de figuier de Barbarie rouge et violet ont une teneur variable de bétalaïne dans la pulpe et la peau (Odoux et Domínguez López, 1996; Sepúlveda *et al.*, 2003c). Ce pigment est obtenu commercialement à partir de la betterave rouge et il est largement utilisé dans l'agro-industrie. Ses utilisations dans les aliments sont autorisées par les législations de l'UE et des EUA (Sáenz *et al.*, 2009). L'extrait de betterave rouge (riche en bétalaïnes) est principalement utilisé pour colorer les aliments, tels que les produits laitiers, les confiseries, les glaces, les desserts, les boissons et les saucisses. Cependant, il a quelques inconvénients: une saveur terreuse, conférée par la géosmine et le 3-sec-butyl-2 méthoxypyrazine, et des niveaux élevés de nitrates. Les figues de Barbarie rouges et violettes sont par conséquent une alternative intéressante comme source de bétanine pour la production de colorants alimentaires (Sáenz *et al.*, 2009; Castellar *et al.*, 2003) (**Figure 12**).

L'utilisation de jus concentré de figues de Barbarie violettes comme colorant alimentaire pour les produits laitiers (par exemple les yaourts) a été étudiée il y a quelques années (Sáenz *et al.*, 2002d; Sepúlveda *et al.*, 2002, 2003c). Les sujets comme la purification du pigment et sa stabilité, cruciale pour l'application dans l'industrie, sont actuellement en cours d'étude.

Castellar *et al.* (2008) ont obtenus un concentré de bétalaïne par fermentation (*Saccharomyces cerevisiae* var. Bayanus AWRI 796) de jus d'*O. stricta*. Le produit final avait 9.65 g de bétanine par litre, un pH de 3.41, 5.2° Brix et une viscosité de 52.5 cP.

D'autres études se concentrent sur la déshydratation de pulpe de figue de Barbarie par atomisation ou lyophilisation pour obtenir des poudres colorantes. Mosshammer *et al.* (2006) ont adopté la lyophilisation et l'atomisation avec de la maltodextrine comme support (18-20 équivalents dextrose [ED]) pour déshydrater du jus d'*O. ficus-indica* cv. 'Gialla'; ils ont rapporté une forte rétention de bétalaïne ($\leq 90\%$) pour les deux types de poudres. Similairement, diverses espèces du figuier de Barbarie violet (*O. stricta*, *O. streptacantha*,

TABLEAU 4 Caractéristiques physiques et chimiques de la pulpe prédiluée et des extraits ultrafiltrés et nanofiltrés de figue de Barbarie violette

Paramètre	P	UF	NF
Sucres totaux (%)	13.2 ± 0.0 b	9.2 ± 0.3 c	17.5 ± 0.1 a
Turbidité (UTN)	2453 ± 64 a	0.00 ± 0.00 b	0.00 ± 0.00 b
Bétacyanines (mg EB litre ⁻¹)	254.0 ± 0.2 a	247.9 ± 4.3 a	216.3 ± 7.0 b
Bétaxanthines (mg EI litre ⁻¹)	85.4 ± 0.1 b	88.6 ± 1.2 a	79.1 ± 2.6 c
Phénoliques totaux (mg EAG litre ⁻¹)	534.8 ± 4.4 b	659.7 ± 5.0 a	673.5 ± 13.5 a
Couleur			
L	12.5 ± 0.9 c	17.8 ± 0.1 b	19.3 ± 0.03 a
C*	48.0 ± 1.7 c	59.3 ± 0.1 b	62.4 ± 0.1 a
H _{ab}	25.9 ± 1.0 c	30.3 ± 0.1 b	31.4 ± 0.1 a

P = pulpe ; UF = pulpe ultrafiltrée ; NF = pulpe nanofiltrée ; EB = équivalent bétanine ; EI = équivalent indicaxanthine ; EAG = équivalent acide gallique. Les lettres différentes dans un rang montrent une différence statistique (Tukey p < 0.05).

Source : Cancino, Robert et Sáenz (données non publiées).



Figure 12
Figues de Barbarie violettes et microparticules
(Photos : C. Sáenz et P. Robert)

O. lasiacantha) ont été atomisées, en utilisant la maltodextrine comme support de séchage (10, 20 ED). Diaz et al. (2006) ont observé qu'après 24 semaines à 25°C, la poudre retenait 86% de sa teneur originelle de bétanine. Obón et al. (2009) ont utilisé le sirop de glucose (29 ED) et rapportés qu'après un mois de stockage à température ambiante, la poudre colorée en conservait 98%. Rodríguez Hernández et al. (2005) ont observé que la poudre de figues de Barbarie, quand elle est reconstituée en jus, présentait une couleur légèrement différente par rapport au jus frais.

La stabilité de la bétalaine est affectée par plusieurs facteurs: le pH, l'activité de l'eau, l'exposition à la lumière, l'oxygène, l'activité enzymatique et, par-dessus tout, la température (Azeredo, 2009; Herbach et al., 2006 ; Castellar et al., 2003). Une technologie - la micro-encapsulation - est disponible pour stabiliser les pigments (Sáenz et al., 2009, 2012b ; Gandía Herrero et al., 2010 ; Vergara et al., 2014 ; Robert et al., 2015).

La micro-encapsulation est une technique impliquant l'introduction de composants bioactifs (solides, liquides ou gazeux) dans une matrice polymérique pour les protéger de l'environnement, de l'interaction avec d'autres composants alimentaires ou pour contrôler la libération (Yáñez Fernández et al., 2002). La micro-encapsulation par atomisation est la technique la plus utilisée: on obtient des poudres avec une faible aw, permettant de simplifier le transport, la manutention et le stockage et assurer la qualité microbiologique (Hayashi, 1989).

Vergara et al. (2014) ont combiné les technologies membranaires (pour séparer les bétalaines) et la micro-encapsulation (pour les protéger), obtenant un colorant sain qui peut être utilisé en agro-industrie. Gomez (2013) a étudié la stabilité des microparticules de bétalaines dans les boissons non alcoolisées, comparant les microparticules de pulpe de figue de Barbarie, et les extraits ultrafiltrés et nanofiltrés; il a conclu que la stabilité des bétalaines est affectée par leur source (pulpe ou extrait) et par l'agent d'encapsulation utilisé.

Les bêtaïnes de pulpe de figues de Barbarie sont plus stables dans les boissons, probablement grâce au mucilage. Alfaro (2014) a appliqué les microparticules de pulpe de figues de Barbarie violette au yaourt, et a rapporté qu'après 45 jours de stockage, 60% des bêtaïnes étaient conservées.

A ce jour, il y a eu relativement peu de recherches sur l'encapsulation des bêtaïnes de figues de Barbarie (*O. ficus-indica*) (Sáenz *et al.*, 2009 ; Vergara *et al.*, 2014 ; Pitalua *et al.*, 2010 ; Gandía Herrero *et al.*, 2010 ; Robert *et al.*, 2015 ; Otárola *et al.*, 2015). Plus de recherche est nécessaire.

Produits extrudés

La cuisson-extrusion est une technologie de haute température et de temps court (HTTC). Bien qu'il y ait peu d'études relatives aux figues de Barbarie et aux cladodes, cette technologie est largement utilisée dans les procédés alimentaires, tels que les céréales de petit-déjeuner, les encas salés et sucrés, les aliments pour bébés et les snacks. Le matériel alimentaire préparé est cuit, en combinant humidité, pression, température et cisaillement. Les facteurs affectant la qualité du produit incluent le type d'extrudeur, la configuration de vis, la vitesse, la température et le taux d'approvisionnement, ainsi que la composition de la matière première et le type d'ingrédients alimentaires utilisés (Singh *et al.*, 2007 ; El Samahy *et al.*, 2007b).

El Samahy *et al.* (2007b) ont étudié les produits extrudés de figues de Barbarie à base de riz - une option innovante pour la production de nouveaux snacks à valeur ajoutée à base de concentrés de pulpe de figue de Barbarie. Dans cette étude, des pulpes de figues de Barbarie orange-jaune et rouge ont été concentrées (40° Brix), ajoutées à de la farine de riz et le mélange mis dans un extrudeur à vis simple. Différentes formulations (variant en ratio de farine de riz et de concentré de pulpe de figues de Barbarie) ont été testées. Les niveaux de substitution de 5% et 10% de concentré de pulpe de cactus ont donné les meilleurs résultats pour les produits extrudés avec de bonnes caractéristiques fonctionnelles, nutritionnelles et sensorielles. Les faibles caractéristiques sensorielles des formules sans pulpe de figues de Barbarie étaient significativement améliorées en ajoutant les concentrés de figues de Barbarie.

Sarkar *et al.* (2011) ont extrudé de la pulpe de figue de Barbarie (variété jaune) avec de la farine de riz. Les auteurs ont testé différents ratios de solides (solides de farine de riz : solides de purée - 6 : 1, 8 : 1 et 10 : 1). Les mélanges étaient séchés dans un extrudeur à double vis. Les résultats ont révélé que certaines caractéristiques, telles que la porosité, diminuaient quand le niveau de solides de fruit augmentait.

La pulpe de figue de Barbarie a du potentiel pour la production de produits extrudés; de plus amples recherches sont nécessaires pour mieux comprendre le comportement de la pulpe de cactus dans ce procédé et améliorer les caractéristiques des produits obtenus.

Hydrocolloïdes (mucilages) des cladodes

Les hydrocolloïdes sont des polysaccharides de complexité variable, généralement utilisés dans l'industrie agro-alimentaire comme additif pour donner de la viscosité à des boissons, des desserts ou à des sauces salades, par exemple. Ils comprennent le mucilage du cactus, un arabinogalactane de type polysaccharide présent dans les raquettes comme dans les fruits de cactus (Sáenz *et al.*, 2004 ; Matsuhiro *et al.*, 2006). Le mucilage a un rôle physiologique important pour les espèces d'*Opuntia* puisqu'il a une forte capacité de rétention de l'eau (Nobel *et al.*, 1992). Il peut être extrait de la matrice (cladodes ou peau des fruits) avec de l'eau et précipité avec de l'éthanol; ou d'autres techniques, telles que le pressage, peuvent être adoptées (Sepúlveda *et al.*, 2007). En général, les rendements d'extraction sont faibles ($\leq 2\%$ du poids frais [PF]), néanmoins, ils offrent une perspective intéressante en considérant que les cladodes (raquettes) de cactus sont généralement des déchets de la taille et qu'ils sont disponibles tout au long de l'année. Diverses méthodes d'extraction ont été rapportées en utilisant différents solvants pour précipiter le mucilage, tels que l'éthanol, l'alcool isopropylique et l'acétone (Rodríguez González *et al.*, 2014 ; Cai *et al.*, 2008 ; Sepúlveda *et al.*, 2007 ; Yahia *et al.*, 2009 ; Medina Torres *et al.*, 2000). Certaines études ont recherché les applications de cet hydrocolloïde dans les nectars de fruits pour remplacer les épaississants habituellement utilisés dans l'agro-industrie (par exemple le CMC) (Sepúlveda *et al.*, 2003a, 2004).

Le mucilage a aussi été testé comme enrobage comestible pour protéger les fruits frais. Del Valle *et al.* (2005) ont utilisé le mucilage comme film comestible pour augmenter la durée de vie des fraises stockées à 5°C, rapportant que les fruits maintenaient leur texture et leur goût et qu'aucune détérioration ne se produisait après 9 jours de stockage. Ce film comestible pourrait fournir une alternative pour la conservation des différents fruits frais, tels que les baies. Cependant, l'application à différents produits est un défi puisque le taux de respiration de chaque type de fruit doit être pris en compte. Aquino *et al.* (2009) ont utilisé une solution de mucilage mélangée avec différentes concentrations d'acide citrique et de bisulfite de sodium pour inhiber le brunissement des tranches de banane pendant le séchage. Les auteurs ont rapporté que la combinaison de 500 ppm de bisulfite de sodium et d'acide citrique (1%), suivant le traitement dans la solution de mucilage (35 mPas), inhibait le brunissement et rendait les tranches de banane plus brillantes.



Récemment, Medina Torres *et al.* (2013) et Otárola *et al.* (2015) ont rapporté que le mucilage pouvait être utilisé comme agent d'encapsulation pour des composants bioactifs, l'acide gallique et les bêtaïnes; cela oriente vers de nouvelles opportunités dans le secteur industriel. Sáenz *et al.* (2009) ont aussi rapporté ce comportement dans une étude de l'encapsulation de bêtaïnes de figes de Barbarie violettes.

Lira Ortiz *et al.* (2014) ont extrait des pectines à faible méthoxyle à partir de peau d'*O. albicarpa* Scheinvar, et ont découvert son potentiel pour ses usages en agro-industrie comme épaississant et gélifiant - ce dernier rôle est obtenu quand des ions calcium sont ajoutés. Les auteurs ont obtenu un rendement de 98 g kg⁻¹ de matière sèche.

Huile de graines

Les figes de Barbarie contiennent une quantité variable de graines, mais elles sont généralement présentes en proportion élevées (10-15 g 100 g⁻¹). Dans la plupart des transformations de figes de Barbarie, les graines sont séparées de la pulpe, donnant de grandes quantités de graines rejetées qui deviennent un problème de déchet environnemental. Pour ces raisons, au cours des dernières décennies, les chercheurs de différents pays ont étudié la composition des graines et ont cherché leurs différentes possibles utilisations.

Sawaya *et al.* (1983) ont étudié la composition des graines, leurs utilisations potentielles en alimentation animale. Ils ont rapporté une teneur en protéines de 16.6%, de 17.2% de gras, 49.6% de fibres et 3.0% de cendres. La teneur minérale est forte en sodium (67.6 mg 100 g⁻¹), en potassium (163.0 mg 100 g⁻¹) et en phosphore (152.0 mg 100 g⁻¹).

L'huile de graine de fige de Barbarie est comestible; elle pourrait être un autre produit nutritif et fonctionnel d'intérêt potentiel pour l'agro-industrie, mais peut-être pas pour une consommation directe (comme indiqué

plus bas). Dans la recherche, l'huile est généralement extraite en utilisant des solvants organiques (4.4-14.10%) (Sawaya et Khan, 1982 ; Sepúlveda et Sáenz, 1988 ; Ennouri *et al.*, 2005 ; Becerril, 1997 ; Tlili *et al.*, 2011 ; Ouerghemmi *et al.*, 2013 ; Chougui *et al.*, 2013), en fonction des facteurs tels que les conditions de culture, la variété et la maturité du fruit (Özcan et Al Juhaimi, 2011). L'utilisation de la presse à froid pour obtenir de l'huile de graine a été rapportée seulement par Gharby *et al.* (2015) au Maroc, avec un rendement de 6-7%. Ce type d'extraction est plus respectueux de l'environnement puisqu'il évite l'utilisation de solvants organiques.

Les rendements en huile comestible sont de 6-17%, qui, en termes de flux de déchets, est raisonnablement comparable à d'autres graines oléagineuses communément utilisées. La production d'huile de graine de figes de Barbarie comme huile comestible est seulement viable avec une transformation intégrée, en utilisant toutes les parties de la plante (Sáenz *et al.*, eds, 2006).

L'huile de graines de figes de Barbarie est riche en acides gras insaturés et a une teneur élevée en acide linoléique (57.7-73.4%) et une faible teneur en acide linoléique. Le **Tableau 5** montre les proportions des principaux acides gras de l'huile.

L'huile a une teneur élevée en acides gras insaturés, ainsi que d'autres composants sains, tels que les stérols, les tocophérols, la vitamine E, le β-carotène et la vitamine K (Ramadan et Mörsel, 2003a ; Kouba *et al.*, 2015). Les composants phénoliques ont été rapportés par Tlili *et al.* (2011) et Chougui *et al.* (2013) : respectivement, 61 mg EAG 100 g⁻¹ et 268 mg 100 g⁻¹, exprimés en équivalent rutine. Des chercheurs du Mexique et de Taiwan ont rapporté des valeurs plus élevées (Cardador Martínez *et al.*, 2011). Plus de recherche est nécessaire avant de pouvoir tirer des conclusions définitives.

Ces propriétés physiques et chimiques ainsi que d'autres, incluant l'indice de réfraction, l'indice d'iode et l'indice

TABLEAU 5 Teneur en acides gras (%) de l'huile de fige de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*) de différents pays

Acide Gras	Pays						
	Maroc ^a	Turquie ^b	Afrique du Sud ^a	Tunisie ^{a,c,g}	Allemagne ^d	Chili ^e	Algérie ^f
Palmitique (C16 : 0)	11.9	10.6-12.8	13.7	12.2-12.7	23.1	16.2	13.1
Stéarique (C18 : 0)	3.4	3.3-5.4	3.38	3.2-3.9	2.67	3.3	3.5
Oléique (C18 : 1n-9)	21.3	13-23.5	15.7	16.4-22.3	24.1	19.9	16.3
Vaccénique (C18 : 1n-7)	–	5.1-6.3	–	4.8	–	–	5.3
Linoléique (C18 : 2n-6)	60.8	49.3-62.1	64.38	53.5-60.6	32.3	57.7	61.8

^a Gharby *et al.* (2015); ^b Mattháus et Özcan (2011); ^c Tlili *et al.* (2011); ^d Ramadan et Mörsel (2003a); ^e Sepúlveda et Sáenz (1988); ^f Chougui *et al.* (2013); ^g Ouerghemmi *et al.*, 2013.

de saponification, mettent en valeur les similarités entre l'huile de graines de figues de Barbarie et d'autres huiles végétales comestibles, telles que l'huile de maïs et l'huile de pépins de raisins. Les rendements d'extraction en huile sont faibles en comparaison avec d'autres huiles comestibles plus communes; l'huile de graines de figues de Barbarie pourrait néanmoins être utilisée dans l'agro-industrie comme substitut au gras dans les produits transformés spéciaux. Cependant, les usages pharmaceutiques et cosmétiques offrent plus et de meilleures alternatives. Dans ce contexte, les graines de figues de Barbarie contribuent aussi aux huiles essentielles, un groupe de composants utilisés principalement dans le domaine pharmaceu-

tique. Ouerghemmi *et al.* (2013) ont rapporté que les huiles essentielles comprennent entre autres, des terpènes, des esters et des aldéhydes, et le rendement pour les graines de figues de Barbarie est proche de 4%.

Ces dernières années, d'autres applications ont émergées, en particulier pour les cosmétiques; cette industrie a exploité les caractéristiques de l'huile (teneur en acides gras polyinsaturés, en tocophérols, en stérols, en phénols) et dans des pays tels que le Maroc une industrie prometteuse a émergé. Il y a plusieurs coopératives et entreprises privées qui extraient cette huile pour des usages cosmétiques, et au moins 20 producteurs d'huile de cactus existent (Abderrahman Ait Hamou, ANADEC, Maroc, communication personnelle). L'industrie extrait l'huile par pressage à froid - un procédé respectueux de l'environnement qui évite l'utilisation de solvants (Berraaouan *et al.*, 2015 ; Gharby *et al.*, 2015). Avant que l'huile ne soit extraite par pressage à froid, les graines doivent être préparées en utilisant une machine spéciale (Figure 13).

Figure 13
Séparateur
de graines
(Photos :
A. Ait-Hamou)



CONCLUSION

Il y a un vaste éventail d'alternatives pour transformer les fruits, les cladodes et les graines d'*Opuntia*. En général, les technologies utilisées sont disponibles pour beaucoup d'agro-industries à petite échelle qui pourraient prendre avantage de cette nouvelle matière première pour diversifier leur production. Par contre, quand le but est la création de nouvelles industries pour la transformation du figuier de Barbarie, des investissements sont nécessaires et doivent venir des gouvernements, des ONG ou d'autres sources. Dans certains pays, un modèle coopératif pourrait être promu. L'immense variété de produits issus du figuier de Barbarie et de sous produits peuvent générer de grands bénéfices à beaucoup de personnes, en particulier ceux vivant dans les zones arides et semi-arides du monde.

Propriétés nutritionnelles et médicinales dérivées des fruits et des cladodes

Mónica Azucena Nazareno

Centre de Recherche et de Transfert de Santiago del Estero

Conseil National de Recherche Technique et Scientifique

Université Nationale de Santiago del Estero, Argentine



Propriétés nutritionnelles et médicinales dérivées des fruits et des cladodes

INTRODUCTION

Les recherches scientifiques ont confirmé que les fruits et les cladodes de cactus peuvent être efficacement utilisés comme sources de nutriments et de produits phytochimiques (par exemple : les sucres, le mucilage, les fibres, les vitamines et les pigments) d'importance nutritionnelle et fonctionnelle. Les produits de cactus montrent des caractéristiques fonctionnelles prometteuses dues à leurs propriétés bénéfiques pour la santé. Ce chapitre présente une description détaillée des principaux composants actifs des différentes espèces étudiées de part le monde.

Depuis les temps anciens, les cactus ont été utilisés pour guérir des maladies et soigner les plaies. Ils sont traditionnellement utilisés, dans plusieurs pays, comme médicament naturel pour le traitement de nombreuses maladies. De plus, les cladodes et les figues de Barbarie sont encore utilisés aujourd'hui dans la médecine traditionnelle comme agents thérapeutiques. Des progrès remarquables ont été réalisés ces dernières décennies pour caractériser les constituants de la plante et expliquer le rôle des molécules naturelles par rapport à la prévention des maladies. Dans ce contexte, il y a de fortes recommandations pour incorporer les fruits et les légumes dans l'alimentation. Plusieurs produits transformés exploitant les propriétés médicinales des cactus sont actuellement disponibles sur le marché mondial ; il y a un intérêt croissant pour l'utilisation industrielle des produits de cactus comme alicaments.

Les cactus sont des cultures à plusieurs usages :

non seulement ils fournissent de la nourriture et de l'aliment pour le bétail mais ils contiennent aussi des produits phytochimiques bioactifs. Les fruits et les cladodes fournissent déjà de l'énergie et des nutriments pour les humains et le bétail. Cependant, les cactus sont aussi des sources riches en substances bénéfiques pour la santé qui peuvent être utilisées pour éviter et soigner des maladies graves. Ces propriétés bénéfiques des cactus, déjà connues des civilisations anciennes, sont aujourd'hui en train de générer de l'intérêt au sein de la communauté scientifique. Les écrits scientifiques concernant les propriétés médicinales du cactus sont en constante expansion, avec de nouvelles découvertes rapportées sur les constituants de la plante responsables de telles activités.

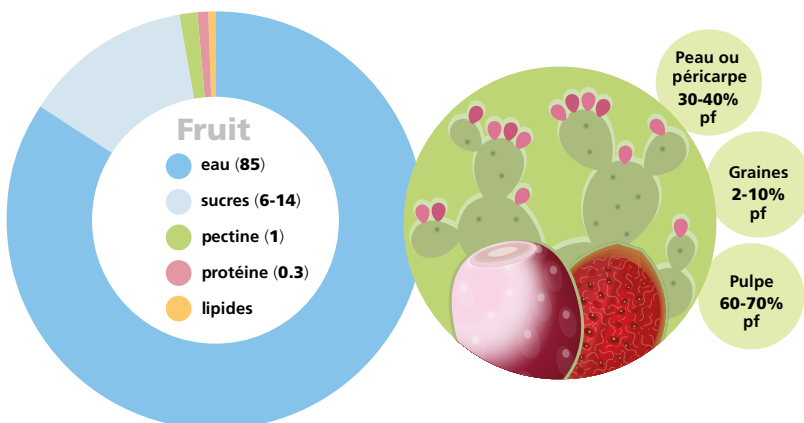
ASPECTS NUTRITIONNELS

La composition en nutriments des fruits et des cladodes dépend de nombreux facteurs : l'espèce, du cultivar ou de la variété, les facteurs environnementaux tels que les conditions pédo-climatiques, la gestion de la culture, incluant la fertilisation et les traitements post-récolte ; et le niveau de maturité.

Fruits

Beaucoup d'espèces de cactus produisent des fruits comestibles. Actuellement, la plupart des fruits de cactus sur le marché mondial appartiennent à l'espèce *Opuntia ficus-indica* et les fruits sont connus sous le nom de « figue de Barbarie ». La figue de Barbarie typique est une baie de forme ovale avec un poids moyen de 100 à 200 g. La pulpe juteuse constitue 60 à 70% du poids total du fruit et contient de nombreuses petites graines dures, variant de 100 à plus de 400 par fruit. Le **Figure 1** montre la composition du fruit. La figue de Barbarie est un fruit non climactérique, elle a un faible taux de respiration (Cantwell, 1995) et une faible production d'éthylène. Par conséquent, les concentrations en nutriments dans le fruit restent sans changement significatif pendant tout le stockage ; cependant, le poids et la fermeté peuvent évoluer. De plus, le pH du fruit, l'acidité et les solides solubles totaux ne varient pas pendant le stockage post-récolte bien que quelques chan-

Figure 1
Composition chimique du figuier de Barbarie (en % de matière fraîche) et constitution du fruit en pourcentage du poids du fruit (pf)
(El Kossori et al., 1998 ; Duru et Turker, 2005)



gements dans la teneur en vitamine C aient été rapportés, en fonction des conditions de stockage (Coria Cayupán *et al.*, 2009).

La composition chimique et nutritionnelle des figues de Barbarie a été largement étudiée (El Kossori *et al.*, 1998 ; Butera *et al.*, 2002 ; Feugang *et al.*, 2006). Sucres, fibre, mucilage et pectines sont les constituants majeurs ; les protéines, les acides aminés, les vitamines et les minéraux sont les composants mineurs (Tesoriere *et al.*, 2005b). Des métabolites secondaires avec des propriétés antioxydantes ont été décrits (Kuti, 2004 ; Yahia et Mondragón, 2011 ; Coria Cayupán *et al.*, 2011). La figue de Barbarie est caractérisée par une teneur élevée en sucre (12 à 17%) et une faible acidité (0.03 à 0.12%) avec des valeurs de pH entre 5 et 7. De plus, la teneur totale en solides solubles varie de 11.6 à 15.3° Brix, augmentant avec la maturité du fruit (Yahia et Mondragón, 2011). Le ratio relatif entre glucose et fructose varie parmi les différentes espèces et au sein des tissus du fruit : 53% de glucose et 47% de fructose de la teneur totale en sucre (Kuti et Galloway, 1994). La pulpe de fruit est aussi riche en minéraux tels que le calcium (59 mg 100 g⁻¹) et le magnésium (98.4 mg 100 g⁻¹) (Stintzing *et al.*, 2001). Les constituants de la pulpe et de la peau du fruit contiennent du mucilage dans les fibres alimentaires ; c'est un hydrocolloïde qui a une capacité élevée pour absorber l'eau. La teneur totale en acides aminés (257.24 mg 100 g⁻¹) est plus élevée que la moyenne des autres fruits ; les principaux acides aminés sont la proline, la taurine et la sérine. Des quantités significatives d'acide ascorbique sont présentes chez *Opuntia ficus-indica*, variant de 180 à 300 mg kg⁻¹ de fruit frais (Piga, 2004).

Les tocophérols, la liposoluble vitamine E, sont trouvés dans la fraction lipidique de la pulpe et des graines de figue de Barbarie. Les isoformes homologues de la vitamine E γ - et δ -tocophérols sont les composants principaux des huiles de graines et de pulpe respectivement, constituant jusqu'à 80% de la teneur totale en vitamine E (Ramadan and Morsel, 2003a). Les lipides sont distribués dans la peau du fruit, la pulpe et les graines. La peau du fruit contient une quantité appréciable d'acides gras polyinsaturés, en particulier l'acide linoléique. Il contient aussi d'autres composants liposolubles, tels que les stérols, le β -carotène et la vitamine K1 ; le principal stérol est le β -sitostérol (Ramadan et Morsel, 2003b). Les polysaccharides et les pectines de la peau ont été caractérisés par Habibi *et al.* (2004).

Graines et huile de graines

Les figues de Barbarie contiennent de nombreuses graines d'une enveloppe dure qui représentent 10 à 15% du poids de la pulpe. Les fruits contiennent un

grand nombre de graines et leur teneur en huile est relativement faible. Elle est de 7 à 15% du poids total des graines. Les acides gras essentiels (principalement l'acide linoléique) forment un pourcentage significatif des acides gras insaturés de l'extrait d'huile de graines. Les acides gras insaturés représentent environ 80% de tous les acides gras (Ennouri *et al.*, 2005). La teneur en acide linoléique varie entre 61.4 et 68.9%. La concentration en acide α -linoléique dans tous les cultivars est inférieure à 1%. La teneur en acide oléique varie entre 12.4 et 16.5%. Par conséquent, bien que la teneur en huile des graines soit relativement faible, sa composition en acides gras indique qu'il y a une utilisation potentielle dans les industries pharmaceutiques et cosmétiques (Labuschagne et Hugo, 2010). L'huile de graine destinée aux cosmétiques se vend à des prix très élevés comme huile employée dans la production de produits anti-âge et antirides. De nouvelles applications sont actuellement en développement par l'industrie des cosmétiques. L'endosperme des graines est composé de polysaccharides riches en arabinane, alors que le composant majeur de l'enveloppe de la graine est la D-xylane (Habibi *et al.*, 2002). Le xylane peut être utilisé comme un adhésif, un épaississant et un additif dans les plastiques ; il est de plus en plus intéressant pour l'industrie agro-alimentaire à cause de son potentiel pour les films d'emballage et les enrobages alimentaires ; il agit aussi comme un émulsifiant et un stabilisateur de mousses de protéines. De nos jours, il peut jouer un rôle important dans le développement de nouveaux produits biomédicaux pour de nouveaux systèmes de diffusion des médicaments, spécialement pour la libération contrôlée.

Cladodes

Les cladodes sont des tiges modifiées aplaties avec une forme allongée ou ovoïde caractéristique ; ils sont capables d'exercer la photosynthèse. Les jeunes cladodes tendres, appelés *nopalitos*, sont consommés comme légumes frais ; ils sont aussi utilisés comme ingrédient dans une large gamme de plats, incluant des sauces, des salades, des soupes, des snacks, des saumures, des boissons, des confiseries et des desserts (Sáenz *et al.*, 2002a). Le composant principal des cladodes est constitué par les polymères contenant des glucides, dont un mélange de mucilage et de pectine. La composition chimique des jeunes cladodes frais est rapportée par Saenz *et al.* (2002a):

- 91% d'humidité (poids frais [P_e])
- 4.5% de glucides totaux
- 1.5% de protéines (Poids sec [P_s])
- 0.2% de lipides (P_l)
- 1.3% de cendres (P_c), dont 90% de calcium



Guevara Figueroa *et al.* (2010) ont analysé la composition du cladode proximal d'*Opuntia* spp. sauvages (**Figure 2**). De plus, 100 g de cladode contiennent 11 mg de vitamine C et 30 µg de caroténoïdes.

Le mucilage est un polysaccharide; il peut être trouvé dans des cellules de stockage spécialisées ou libre au sein des cellules ou dans les espaces intracellulaires des tissus chlorenchymateux et parenchymateux des cladodes. Le mucilage sec contient en moyenne : 5.6% d'humidité ; 7.3% de protéines ; 37.3% de cendres ; 1.14% d'azote ; 9.86% de calcium ; 1.55% de potassium (Sepúlveda *et al.*, 2007). Sur la base de sa composition chimique, le mucilage est considéré comme un polymère (similaire à la pectine), composé d'arabinose, de galactose, de xylose et de rhamnose comme sucre neutre, et une petite quantité d'acide galacturonique (Medina Torres *et al.*, 2000 ; Madjdoub *et al.*, 2001). En plus de la consommation directe des rameaux tendres, les cladodes matures sont broyés pour en faire de la farine et d'autres produits. La farine de nopal est une source riche en fibres alimentaires, atteignant jusqu'à 43% du poids sec (Ps) (Sáenz *et al.*, 2002a). Elle peut être utilisée pour renforcer les recettes contenant de la farine provenant d'autres sources.

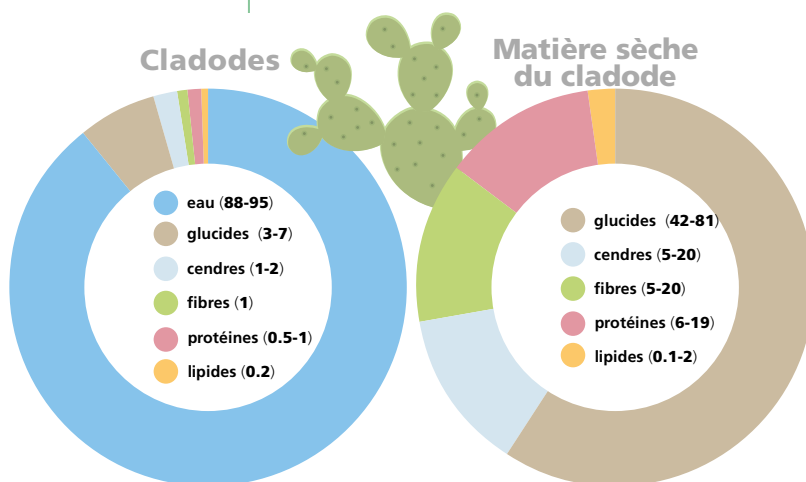


Figure 2
Composition du cladode proximal, % (Stintzing and Carle, 2005; Guevara Figueroa *et al.* 2010)

Figure 3
Principaux produits phytochimiques dans les figues de Barbarie et les cladodes



COMPOSÉS PHYTOCHIMIQUES BIOACTIFS DANS LES CACTUS

Les cactus sont aussi des sources importantes de substances bioactives et d'excellents candidats pour la préparation d'aliments fonctionnels et d'aliments. Les fruits, les cladodes, les graines et les fleurs ont tous une teneur élevée en constituants chimiques, ajoutant de la valeur aux produits de cactus.

Fruits

Les figues de Barbarie présentent une activité antioxydante élevée, attribuée à la présence de vitamine C, de flavonoïdes et de bétalaïnes (Galati *et al.*, 2003a ; Kuti, 2004). L'activité antioxydante du fruit double celle de la poire, de la pomme, de la tomate, de la banane et du raisin blanc, et est similaire à celle du raisin rouge et du pamplemousse (Butera *et al.*, 2002).

Les bétalaïnes sont des pigments contenant de l'azote et peuvent être classifiées comme bétacyanines rouges (par exemple : bétanine) et bétaxanthines jaune (par exemple : indicaxanthine). Les bétacyanines sont des ammoniums conjugués d'acide bétalamique avec la cyclo-DOPA ; les bétaxanthines sont des conjugués d'acide bétalamique avec des acides aminés ou des amines. Les bétalaïnes sont les principaux pigments responsables de la couleur du fruit mûr et, par conséquent, elles sont un facteur majeur pour l'acceptation par le consommateur. La concentration en pigments dépend de plusieurs facteurs, en particulier du stade de maturité du fruit (Coria Cayupán *et al.*, 2011). Stintzing *et al.* (2005) ont caractérisé la composition des figues de Barbarie en bétalaïnes. Ces pigments ne donnent pas seulement la couleur : leurs propriétés antioxydantes sont plus fortes que celles de l'acide ascorbique (Butera *et al.*, 2002 ; Stintzing *et al.*, 2005). Au



contraire des anthocyanines (un autre groupe de pigments rouges naturels), les bêtaïnes sont stables dans une plus large gamme de pH et sont donc plus appropriées pour l'utilisation comme colorant alimentaire dans les produits de faible acidité (Stintzing *et al.*, 2001). A cause de leur grande variété structurale, et donc leur diversité de couleur, les bêtaïnes constituent une source très prometteuse de colorants naturels qui peuvent être utilisées comme colorants fonctionnels. En comparaison avec les betteraves rouges, les figues de Barbarie n'offrent pas seulement une large gamme de couleurs, elles ont aussi des avantages technologiques : l'absence de la géosmine (goût terreux indésirable) ; des niveaux faibles de nitrates et l'absence de contaminations microbiennes provenant du sol.

La présence de composés phénoliques a aussi été détectée dans la pulpe des fruits de cactus. Kuti (1992) a rapporté un effet antioxydant dû aux flavonoïdes majeurs retrouvés dans les fruits du cactus (par exemple : la quercétine, le kampférol et les dérivés d'isorhamnétine). Les dérivés de flavonols détectés dans les *Opuntia* spp. ont été revus par Stintzing et Carle (2005). La peau a une teneur phénolique plus élevée que la pulpe (Stintzing *et al.*, 2005). Par conséquent, du point de vue fonctionnel, il est avantageux de transformer la pulpe et la peau. Lee *et al.* (2002a) ont trouvé que les flavonoïdes de cactus sont aussi efficaces pour protéger l'ADN des plasmides contre les dégâts induits par les radicaux hydroxyles.

Cladodes

D'autres composants fonctionnels, tels que les dérivés de chlorophylle, les acides aminés et les flavonoïdes, se trouvent dans les raquettes de cactus (**Figure 3**). Guevara Figueroa *et al.* (2010) ont analysé les cladodes d'*Opuntia* spp. commerciaux et sauvages du Mexique et ont évalué les profils polyphénoliques et de flavonoïdes dans les produits frais et transformés de nopal. La présence de 5 flavonoïdes majeurs (isoquercitrine, l'isorhamnétine-3-O-glucoside, la nicotiflorine, la rutine et la narcissine) a été observée dans toutes les variétés et la nicotiflorine était prédominante.

Fleurs

Les fleurs de cactus accumulent des bêtaïnes ainsi que des composés phénoliques sans couleur (Ahmed *et al.*, 2005). La composition chimique des fleurs d'*O. ficus-indica* et d'*O. stricta* extraites à quatre stades de floraison a été étudiée par Ammar *et al.* (2012). Les activités anti-radicalaires, antibactériennes et antifongiques dans l'éthanol, ainsi que les extraits d'hexanes de fleurs, ont aussi été analysés. La teneur en composés phénoliques varie manifestement avec le stade de floraison, et ces constituants actifs sont à leur pic pendant le stade post-florai-

son. De Léo *et al.* (2010) ont rapporté le profil chimique d'un extrait de méthanol de fleurs d'*O. ficus-indica*. Les fractions volatiles de trois espèces obtenues à partir de distillation à l'eau, ont été caractérisées et testées comme agents antifongiques (Bergaoui *et al.*, 2007).

PROPRIÉTÉS MÉDICINALES

Les cactus étaient utilisés pendant des milliers d'années par les civilisations anciennes pour soigner des maladies et guérir les plaies. Les origines et l'histoire du cactus comme médicament sont intimement liées aux anciennes civilisations mésoaméricaines. Pendant 12 000 ans, le cactus frais a été consommé par les indigènes pour ses qualités nutritionnelles et ses propriétés guérissantes. Les cladodes de cactus, les fruits, les graines et les fleurs ont été utilisés dans la médecine traditionnelle de plusieurs pays pendant des siècles.

Il y a de nombreux rapports indiquant qu'une alimentation riche en fruit et légumes est liée à une plus faible incidence de maladies coronariennes et quelques types de cancers ; cela suggère que ce type d'alimentation a des effets positifs sur la santé (Bazzano *et al.*, 2002). Ces effets bénéfiques sont associés, non seulement à la teneur en nutriments et vitamines des aliments, mais aussi avec l'action de certains composants bioactifs. Les substances phytochimiques aux propriétés antioxydantes favorisent la bonne santé en protégeant contre les dégâts oxydatifs induits par les espèces d'oxygène réactif (Prakash et Gupta, 2009).

Plusieurs études démontrent que les fruits et les cladodes du figuier de Barbarie ont des niveaux élevés de nutriments, de minéraux et de vitamines, ainsi que d'antioxydants. Le figuier de Barbarie semble être une excellente source de substances phytochimiques d'importance pour les aliments (El Mostafa *et al.*, 2014). Le cactus peut être totalement exploité puisque ses composants bioactifs peuvent être extraits à partir de différentes parties : les fleurs, les fruits, les cladodes, les racines et les graines (Nazareno, 2014). La **Figure 4** résume les propriétés médicinales les plus pertinentes attribuées aux produits du cactus.

Fruits

Ajouter des figues de Barbarie à l'alimentation d'un humain sain décroît le stress oxydatif, en augmentant le statut global d'antioxydants. Les effets des bêtaïnes de cactus sur le stress oxydatif chez l'humain ont été étudiés par Tesoriere *et al.* (2003, 2004, 2005a), qui ont rapporté que l'ingestion de fruits produisait une diminution des marqueurs de stress oxydatif, inhibait l'oxydation des LDL et augmentait la résistance à l'hémolyse



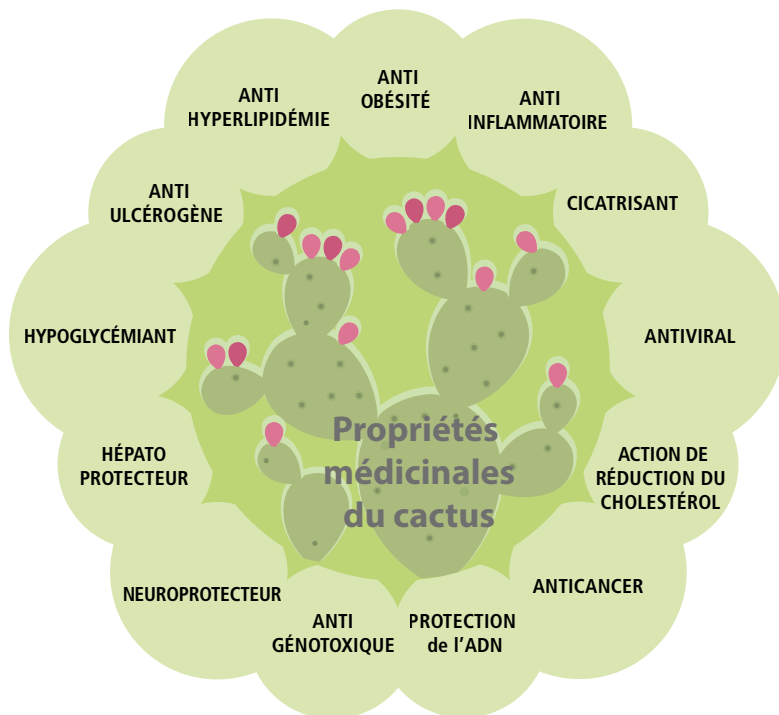


Figure 4
Propriétés médicinales
du cactus

oxydative des cellules sanguines rouges dans des expériences *ex vivo*. Budinsky *et al.* (2001) ont montré que la consommation régulière d'*O. robusta* réduisait les dégâts engendrés par l'oxydation.

Zou *et al.* (2005) ont étudié la capacité de l'extrait de figues de Barbarie à supprimer la cancérogénèse dans des lignées de cellules cancéreuses humaines cultivées *in vitro* et sur un modèle animal *in vivo*. Les résultats ont montré que l'extrait de cactus inhibait la croissance *in vitro* des cellules cancéreuses ovariennes, cervicales et de vessie et mettait fin à la croissance tumorale chez les animaux inoculés avec des cellules cancéreuses ovariennes. Les effets antiprolifératifs de la bétanine sur la lignée K562 de cellules de la leucémie myéloïde chronique humaine ont été rapportés par Sreekanth *et al.* (2007). Les extraits de fruit d'*O. humifusa* ont été essayés contre le cancer du sein et les lignées de cellules de glioblastome humain (Hahm *et al.*, 2010). Des études émergentes indiquent des activités anticancéreuses remarquables manifestées par les extraits de figues de Barbarie. Les activités chimio-préventives et anticancéreuses des extraits crus de plantes appartenant à la famille des Cactaceae, ainsi que leurs principaux constituants actifs ont été très bien revus par Harlev *et al.* (2013).

Les études *in vitro* de l'interaction entre les bétalaines purifiées, l'acide hypochlorique et la myéloperoxydase humaine ont révélé l'action anti-inflammatoire de ces pigments du fruit (Allegra

et al., 2005). Récemment, des effets anti-inflammatoires remarquables de l'indicaxanthine ont été rapportés sur un modèle animal (Allegra *et al.*, 2014). Les effets anti-ulcérogènes et anti-gastrites des fruits de cactus ont été étudiés chez le rat par Lee *et al.* (2001) et Galati *et al.* (2003a). L'hépatoprotection par l'extrait et le jus de fruit d'*O. ficus-indica* a été démontrée chez le rat (Galati *et al.*, 2005 ; Alimi *et al.*, 2012). Kim *et al.* (2006) ont démontré l'action neuroprotectrice des extraits de fruit d'*O. ficus-indica* contre les blessures neuronales oxydatives induites par les excitotoxines dans les cellules corticales de souris. Ils ont aussi rapporté des expériences *in vivo* où les extraits méthanoliques de fruits réduisaient les dommages neuronaux produits par l'ischémie globale chez la gerbille de 36% et ont attribué ces effets à l'action antioxydante des bioflavonoïdes. Wolfram *et al.* (2002) ont rapporté que l'ingestion de 250 g jour⁻¹ de fruits d'*O. robusta* produisait un effet anti-hyperlipidémique et une action réductrice du cholestérol pour des humains hyperlipidémiques non-diabétiques ; il y a aussi des rapports à propos des effets sur le métabolisme du glucose. L'action hypocholestérolémique peut être partiellement expliquée par la teneur en fibres (pectine) des fruits. Bien que le mécanisme hypoglycémique soit encore peu clair, les recherches indiquent que c'est parce que les fruits semblent favoriser - pour les diabétiques et non-diabétiques - une rapide et meilleure entrée du glucose dans la cellule, et l'amélioration de la sensibilité cellulaire à l'insuline est suspectée. L'amélioration des fonctions des plaquettes due à la consommation régulière de figues de Barbarie (250 g jour⁻¹) chez des volontaires sains et des patients atteints d'hypercholestérolémie hétérozygote familiale moyenne a été décrite par Wolfram *et al.* (2003). L'ingestion de fruits induit des actions bénéfiques sur le système cardiovasculaire en diminuant l'activité des plaquettes et en améliorant l'équilibre hémostatique.

Cladodes

Quand les cladodes d'*O. ficus-indica* étaient servis à des rats hypercholestérolémiques, une diminution nette des niveaux de cholestérol et de triglycérides a été remarquée dans les échantillons de plasma. Des effets anti-hyperlipidémiques et de réduction du cholestérol ont été observés chez le cochon d'inde, le rat et la souris (Galati *et al.*, 2003b ; Oh et Lim, 2006). Des expériences sur des patients atteints de diabète sucré non dépendant à l'insuline ont confirmé les effets hypoglycémiques des cladodes d'*O. streptacantha*. De plus, la consommation de jeunes cladodes réduit l'obésité

sité et le glucose sanguin. Le facteur anti-obésité, l'action hypoglycémiant et les effets antidiabétiques ont tous été observés chez les rats et les humains (Bwititi *et al.*, 2000 ; Frati Munari *et al.*, 2004 ; Yang *et al.*, 2008).

Galati *et al.* (2001) ont suggéré que les cladodes d'*O. ficus-indica* stimulent une réponse protectrice dans la muqueuse gastrique, évitant le développement d'ulcères induits par l'éthanol (traitement préventif) et favorisent un rétablissement plus rapide (traitement curatif). L'effet cyto-protecteur des cladodes d'*O. ficus-indica* est attribué aux propriétés physicochimiques du mucilage (Galati *et al.*, 2001). Les cladodes d'*O. ficus-indica* produisent une cyto-protection en augmentant la sécrétion de mucus dans les muqueuses gastriques des rats affectés par des ulcères induits par l'éthanol (Galati *et al.*, 2002). L'administration de cladode de cactus est recommandée pour les traitements curatifs et préventifs des ulcères gastriques (Lee *et al.*, 2002a). L'extrait de plante de *O. ficus-indica* peut soulager les symptômes de gueule de bois chez les humains (Wiese *et al.*, 2004).

De plus, l'effet protecteur du jus de cladode d'*Opuntia ficus-indica* contre la toxicité induite par le nickel est rapporté par Hfaiedh *et al.* (2008). L'exposition expérimentale au Ni a généré des dérivés réactifs de l'oxygène (DRO), menant à l'augmentation de la peroxydation des lipides, la perte de l'intégrité membranaire et l'altération du système antioxydant cellulaire. C'est une indication que le jus de cladode peut prévenir le stress oxydatif et en diminuer les paramètres chez le rat ; de plus, l'ingestion régulière de jus de cladode peut contrecarrer les effets peroxydants du nickel. Des effets protecteurs similaires contre les dégâts oxydatifs induits par divers produits toxiques ont aussi été rapportés par Ncibi *et al.* (2008) et Zourgui *et al.* (2008). L'action neuroprotectrice contre les blessures oxydatives neuronales des extraits de flavonoïdes d'*O. ficus-indica* a aussi été évaluée; on les a estimés efficaces dans les cellules corticales de souris cultivées et contre l'ischémie globale chez les gerbilles (Kim *et al.*, 2006).

Les extraits de cladode pourraient avoir un effet hépato-protecteur contre l'aflatoxicose chez la souris ; ils agissent probablement en favorisant le système immunitaire (Brahmi *et al.*, 2011). Des expériences concernant l'action antivirale des extraits de cactus ont été menées. Un extrait de cladode d'*Opuntia streptacantha* a montré des propriétés antivirales envers les virus à ADN, tels que l'herpès et les virus à acide ribonucléique (ARN), tels que la grippe de type A et le virus de l'immunodéficience humaine VIH¹. Le principe actif a été localisé dans les tissus non cuticulaires extérieurs et attribué à une protéine dont le mécanisme d'action est inconnu (Ahmad *et al.*, 1996). La réplication des virus à ADN et

ARN était inhibée. Un Brevet International¹ affirme que le cactus nopal a un effet contre l'herpès simplex et les virus de la grippe A. Les dérivés de la chlorophylle sont suggérés comme composé actif.

PERSPECTIVES

Le cactus peut être considéré comme une source importante de substances bioactives et d'excellents candidats pour les alicaments et les préparations alimentaires fonctionnelles. Les données scientifiques révèlent une teneur élevée en certains constituants chimiques dans les fruits, les cladodes, les graines et les fleurs, qui peuvent ajouter de la valeur aux produits de cactus. En outre, quelques constituants montrent des caractéristiques prometteuses comme substances bénéfiques pour la santé. Plusieurs produits transformés sont actuellement disponibles sur le marché des alicaments bénéficiant des propriétés médicinales des cactus. Les fruits sont transformés pour préparer des confiseries, des sirops, des pâtes à tartiner, des confitures et des gelées. Le jus de fruit peut être utilisé pour guérir la gueule de bois. Le jus naturel de figue de Barbarie est vendu comme une boisson pour satisfaire la soif, riche en vitamine C, en flavonoïdes et en anti-oxydants et comme agent anti-âge et anti-inflammatoire. On considère aussi qu'il favorise une santé cellulaire optimale et détoxifie le corps.

Il y a le potentiel pour exploiter davantage les propriétés fonctionnelles des produits de cactus dans les industries agro-alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques, mais plus de recherches scientifiques sont nécessaires dans ces domaines. Bien que les progrès faits à ce jour soient significatifs, il reste beaucoup à explorer. Les cladodes de cactus ont des propriétés bénéfiques pour la santé et ils sont déshydratés ou mis en poudre pour préparer des pilules et capsules de nopal. Par contre, l'huile issue des graines est utilisée dans les cosmétiques. La demande globale croissante pour les alicaments et les produits sains est accompagnée par le développement de produits naturels pour le traitement et la prévention de maladies humaines.

Plus d'études sur les espèces de cactus sont nécessaires pour trouver de nouveaux composés actifs et leurs applications pharmaceutiques et industrielles. De plus, les formulations d'antioxydants doivent être testées pour rechercher des effets synergétiques possibles entre les composants. La demande du marché devrait être stimulée en faisant connaître ces propriétés du cactus. Bien que les propriétés bénéfiques du cactus soient connues depuis les temps anciens, c'est seulement récemment qu'ils ont été scientifiquement prouvés.



¹ Brevet International (1993) : Skinner et Ezra (GB, Israël). Effet du nopal cactus sur l'herpès simplex et les virus de grippe A.

TABLEAU 1 Propriétés médicinales des produits de cactus

Espèce de cactus, organe utilisé et activités	Système étudié et référence
Action antivirale	
<i>O. streptacantha</i> extrait de cladodes	Inhibition de la réplication intracellulaire des virus et inactivation extracellulaire des virus (Ahmad <i>et al.</i> , 1996)
<i>Opuntia</i> sp. cladodes	Cobaye (Fernández <i>et al.</i> , 1994)
Effets anti-hyperlipidémiques et réduction du niveau de cholestérol	
<i>O. robusta</i> fruits	Humains hyper-lipidémiques non-diabétiques (Wolfram <i>et al.</i> , 2002)
<i>O. ficus-indica</i> cladode	Rats (Galati <i>et al.</i> , 2003b)
<i>O. ficus-indica</i> graines et huile de graines	Rats (Ennouri <i>et al.</i> , 2006a, b, 2007)
<i>O. ficus-indica</i> var. Saboten	Souris (Oh and Lim, 2006)
Facteur anti-obésité	
<i>Opuntia</i> sp. cladode	Humains (Frati Munari <i>et al.</i> , 2004)
<i>O. megacantha</i>	Rats diabétiques (Bwititi <i>et al.</i> , 2000)
<i>O. lindheimeri</i>	Cochons diabétiques (Laurenz <i>et al.</i> , 2003)
Effets hypoglycémiques et anti-diabétiques	
<i>O. ficus-indica</i> , <i>O. lindheimeri</i> et <i>O. robusta</i> fruits	Rats diabétiques (Enigbocan <i>et al.</i> , 1996)
<i>O. streptacantha</i>	Humains (Meckes Lozyoa, 1986)
<i>O. monacantha</i> extrait de cladode	Rats diabétiques (Yang <i>et al.</i> , 2008)
<i>O. ficus-indica</i> graines et huile de graines	Rats (Ennouri <i>et al.</i> , 2006a, b)
<i>O. streptacantha</i>	Humains (Frati Munari <i>et al.</i> , 1992)
<i>O. filiginosa</i> extrait de fruit	Rats (Trejo González <i>et al.</i> , 1996)
Actions anti-inflammatoires	
<i>O. humifusa</i> extraits <i>O. ficus-indica</i> indicaxanthine	Cellules macrophages produisant de l'oxyde nitrique (Cho <i>et al.</i> , 2006); rats pleurétiques (Allegraet <i>et al.</i> , 2014)
Propriétés cicatrisantes	
<i>O. ficus-indica</i> cladodes	Humain (Hegwood, 1990)
Neuroprotection	
<i>O. ficus-indica</i> var. Saboten, extrait	Cellules corticales primaires cultivées (Dok Go <i>et al.</i> , 2003)
<i>O. ficus-indica</i> extrait de fruit	Etude <i>in vitro</i> sur des cellules corticales de souris cultivées et étude <i>in vivo</i> sur des Gerbilles (Kim <i>et al.</i> , 2006)
Effets anti-ulcérogéniques et anti-gastrites	
<i>O. ficus-indica</i> cladodes	Rats (Galati <i>et al.</i> , 2001, 2002)
<i>O. ficus-indica</i> jus de fruit	Rats (Galati <i>et al.</i> , 2003a)
<i>O. ficus-indica</i> var. Saboten, tige	Rats (Lee <i>et al.</i> , 2002a)
<i>O. ficus-indica</i> fruit	Rats (Lee <i>et al.</i> , 2001)
Effet réduisant le stress oxydatif chez les humains	
<i>O. ficus-indica</i> fruits	Humains (Tesorieri <i>et al.</i> , 2004); LDL humaine <i>in vitro</i> (Tesorieri <i>et al.</i> , 2003) cellules humaines <i>ex vivo</i> (Tesorieri <i>et al.</i> , 2005b)
<i>O. robusta</i> fruits	Humains (Budinsky <i>et al.</i> , 2001)
Soulagement des symptômes de la gueule de bois due à l'alcool	
<i>O. ficus-indica</i> extrait de plante	Humains (Wiese <i>et al.</i> , 2004)
Protection contre la toxicité induite par le nickel	
<i>O. ficus-indica</i> extrait de cladode	Rats (Hfaiedh <i>et al.</i> , 2008)
Protection contre les dégâts oxydatifs induits par la zéaralénone	
<i>O. ficus-indica</i> cladode	Souris (Zourgui <i>et al.</i> , 2008)



(suite)

Espèce de cactus, organe utilisé et activités	Système étudié et référence
Effets diurétiques	
<i>O. ficus-indica</i> cladodes, fleurs et fruits non commercialisables	Rats (Galati <i>et al.</i> , 2002)
Réduction des dégâts sur l'ADN	
<i>O. ficus-indica</i> extrait de fruits	Lymphocytes périphériques humains (Siriwardhana <i>et al.</i> , 2006)
Propriétés de prévention du cancer	
<i>O. ficus-indica</i> extrait aqueux de fruits	Cellules épithéliales ovariennes et cervicales, et cellules cancéreuses ovariennes, cervicales et de la vessie (Zou <i>et al.</i> , 2005), cellules ovariennes cancéreuses (Feugang <i>et al.</i> , 2010); lignées de cellules leucémiques (Sreekanth <i>et al.</i> , 2007)
<i>O. humifusa</i> extrait de fruit	Cancer du sein et lignées cellulaires de glioblastome humain (Hahm <i>et al.</i> , 2010; Harlev <i>et al.</i> , 2013)
<i>Opuntia</i> spp. jus de fruit	Cellules cancéreuses hépatiques, mammaires, du colon et de la prostate (Chavez Santoscoy <i>et al.</i> , 2009)
<i>Hylocereus</i> spp. extraits	Action antiproliférative in vitro (Kim <i>et al.</i> , 2011; Wu <i>et al.</i> ; Jayakumar and Kanthimathi, 2011)
<i>O. humifusa</i> poudre de fruit du cactus	Réduction du nombre de papillomes et d'hyperplasie épidermique chez la souris (Lee <i>et al.</i> , 2012)
Protection du foie	
<i>O. ficus-indica</i> jus de fruit et extrait	Foie (Galati <i>et al.</i> , 2005; Alimi <i>et al.</i> , 2012; Brahmi <i>et al.</i> , 2011; Ncibi <i>et al.</i> 2008)
Capacité anti-clastogène	
Jus de fruit de <i>cactus</i>	Souris (Madrigal Santillán <i>et al.</i> , 2013)
Augmentation de la densité des os	
<i>O. humifusa</i> cladodes lyophilisés	Rats (Kang <i>et al.</i> , 2012)
Amélioration de la sensibilité à l'insuline	
<i>O. humifusa</i> cladodes lyophilisés	Rats (Kang <i>et al.</i> , 2013)



Biens et services écosystémiques de cactus

Mounir Louhaichi^a, Ali Nefzaoui^b et Juan Carlos Guevara^c

^a Centre International de Recherche pour l'Agriculture dans les Zones Arides, Amman, Jordanie

^b Centre International de Recherche pour l'Agriculture dans les Zones Arides, Tunis, Tunisie

^c Institut Argentin de Recherche pour les Terres Arides, Mendoza, Argentine



INTRODUCTION

La famille des Cactaceae comprend environ 1 600 espèces originaires d'Amérique mais disséminées à travers le monde entier. Dans cette famille, *Opuntia* est le genre le plus connu et *O. ficus-indica* (L.) Mill. est cultivé dans plus de 20 pays (Nefzaoui *et al.*, 2014). Les cactus sont cultivés sur 2.6 millions d'hectares à travers le globe et sont principalement utilisés pour le fourrage ou le pâturage: en Tunisie (600 000 ha), au Mexique (230 000 ha) et en Algérie (150 000 ha) (Nefzaoui et Ben Salem, 2006); en Afrique du Sud (525 000 ha) et en Ethiopie (355 000 ha) (Revels Hernández *et al.*, 2010) ; au Brésil (> 600 000 ha) (Torres Sales, 2010); et dans le sud du Maroc (90 000 ha) (Anegay et Boutoba, 2010). En Argentine, la surface cultivée de cactus est estimée à 10 000 ha pour le fourrage et la production de fruits, avec les sirops comme produit secondaire (Dubeux *et al.*, 2013) ; la surface cultivée uniquement pour la production fruitière était de 2 000 ha en 2003 (Ochoa, 2006).

Les températures froides d'hiver sont la principale limite à la culture du cactus dans des zones d'Argentine et du nord du Mexique (Borrego Escalante *et al.*, 1990), le Bassin Méditerranéen (Le Houérou, 1996a), les steppes des plateaux arides de l'Asie de l'ouest (Le Houérou, 1996b) et le sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique (Parish et Felker, 1997). Dans une diversité de conditions climatiques, les limites thermiques pour les espèces telles qu'*O. ficus-indica* sont fixées par une température minimale moyenne journalière du mois le plus froid de 1.5-2.0°C (Le Houérou, 1995). Les cactus et les autres buissons fourragers tolérants à la sécheresse et efficaces à l'utilisation de l'eau peuvent survivre, pour une année donnée, avec seulement 50 mm de précipitations, mais sans croissance ni production. Des précipitations annuelles moyennes de 100-150 mm sont le minimum requis pour la mise en place réussie d'une plantation pluviale de cactus (Le Houérou, 1994), à condition que le sol soit sableux et profond (Le Houérou, 1996a). Les plantations de buissons fourragers tolérants à la sécheresse et efficaces à l'utilisation de l'eau, spécialement les espèces d'*Opuntia*, ont été mises en place comme réserve tampon d'aliment dans une stratégie d'atténuation des effets de la sécheresse dans les systèmes de production animale dans diverses zones arides et semi-arides du monde (Le Houérou, 1991). Les cactus ont une bonne efficacité de l'utilisation de l'eau, grâce

à leur type d'assimilation du métabolisme acide crassulacéen (CAM) (Han et Felker, 1997 ; Nobel, 1991, 1994) ; pour cette raison, ils sont spécialement adaptés pour la production de fourrage dans les terres arides.

Les *Opuntia* spp. peuvent supporter une sécheresse prolongée, des températures élevées, et l'érosion hydraulique et éolienne. Cette capacité, en plus d'une large gamme d'utilisations économiques, les rend idéals pour le développement agricole dans les zones affectées par les deux plus gros problèmes environnementaux du monde: la désertification et le changement climatique (Nefzaoui et El Mourid, 2008).

« Humble », « agressif », « or vert », « joyau vert », « fruit des pauvres », « fruits d'épines et de délices », « trésor sans prix », « trésor sous les épines », « dromadaire du monde végétal », « plante du futur » et « arbre monstrueux » sont juste quelques-uns des nombreux épithètes utilisés pour décrire la plante et le fruit du figuier de Barbarie (*Opuntia* spp.). Ils reflètent ce qu'est la « tuna » pour ceux qui travaillent ou vivent avec une plante appréciée et aimée par beaucoup, mais crainte et détestée par d'autres. Dans tous les cas, cette « humble » plante continue silencieusement mais fermement à gagner une place de premier plan dans les programmes visant au développement agricole des zones arides et semi-arides dans de nombreux pays.

Les cactus, endémiques d'Amérique, ont été incorporés dans beaucoup de cultures originaires d'Amérique. Par exemple, le nopal (*Opuntia* spp.) est une des plus importantes ressources dans les zones arides et semi-arides du Mexique, où il a influencé la culture, l'histoire et les traditions. Dans la vie sociale, économique et religieuse des Aztèques, la plante a joué un rôle très important et le symbole de la Grande Tenochtitlan (aujourd'hui la ville de Mexico) était un aigle sur un cactus dévorant un serpent. Ce symbole est aujourd'hui incorporé à l'emblème national du Mexique. L'*Opuntia* est aussi lié au sentiment d'unité nationale au Mexique et est fréquemment associé à la Vierge de Guadalupe et l'Indien Saint Juan Diego.

Le figuier de Barbarie fait maintenant partie de l'environnement naturel, et a été intégré dans la culture de beaucoup de pays où il est bien adapté à des zones caractérisées par la sécheresse, des précipitations irrégulières et des sols pauvres exposés à l'érosion. Il est naturalisé dans le paysage comme membre de la flore locale, comme on peut le constater sur les cartes

postales et la publicité touristique en Italie, en Espagne, au Maroc, en Israël, au Kenya, au Yémen et en Arabie Saoudite. En particulier, Lorenzo Bernini (1598-1680) a inclus le cactus dans la fontaine des Quatre Rivières sur la Piazza Navona à Rome où le Rio de la Plata est représenté.

La controverse pour savoir si c'est une plante utile ou nuisible dépend de l'espèce, où, quand et comment elle est cultivée, et à qui elle s'applique. Il y a des évaluations contradictoires, vraies dans un cas et fausses dans un autre, sur la base d'expériences dans différentes conditions écologiques, économiques et sociales. Les différentes situations évoluent en fonction des réalités individuelles. Par exemple, en Australie et en Afrique du Sud, le contrôle biologique a été utilisé pour arrêter son expansion voire l'exterminer dans certaines zones. D'autre part, en Ethiopie et en Erythrée, où le climat est adapté et où il n'y a pas d'ennemi naturel, le nopal a envahi avec succès des milliers d'hectares après qu'il y ait été introduit il y a plus de 150 ans. Dans tous les cas, bien que cela puisse affecter les ressources génétiques des plantes locales, la réalité actuelle est qu'après tant d'années, les personnes ont une dépendance économique aux produits et aliments du cactus, que l'introduction du nopal soit une malédiction ou une bénédiction. Son potentiel d'adaptabilité et d'expansion rapide dans les zones sauvages ou dans les zones antérieurement perturbées par l'intervention humaine est un autre sujet qui exige un examen. Le figuier de Barbarie est plus qu'utile: c'est une plante vitale qui a été appelée « culture qui sauve la vie des humains et des animaux », spécialement durant les sécheresses sévères (Arias Jimenez, 2013b).

Il y a de nombreuses raisons derrière la diffusion, de par le monde, d'*Opuntia* spp et particulièrement l'*O. ficus-indica*, dont :

- Des pratiques culturelles simples nécessaires pour faire pousser la plante ;
- Une mise en place rapide, sitôt après son introduction dans une nouvelle zone;
- Des pratiques de multiplication faciles qui favorisent la diffusion rapide et l'échange de matériel entre les utilisateurs ;
- La capacité de croître dans des conditions très difficiles caractérisées par des températures élevées, le manque d'eau et des sols pauvres ;
- La production de revenus via la vente de fruits précieux et appréciés ;
- L'utilisation des tiges dans l'alimentation humaine et en fourrage pour le bétail ;
- Le déploiement utile des plantes pour clôturer les exploitations agricoles ;
- La valeur nutritionnelle des fruits juteux ;

- La longue durée de conservation des fruits ;
- La production d'une large gamme de dérivés industriels à partir des fruits.

Ces facteurs ainsi que d'autres ont contribué à une telle vaste diffusion, des régions d'origine en Amérique Latine à des zones lointaines, traversant les continents, les cultures et les traditions.

Principaux objectifs de ce chapitre

Malgré son importance écologique, économique et sociale, l'*Opuntia* (figuier de Barbarie) continue de recevoir une attention scientifique, politique et médiatique limitée. Des plantations bien entretenues de cactus génèrent des externalités positives et des biens et services environnementaux: elles peuvent jouer un rôle majeur, non seulement en termes d'amélioration de la biodiversité et de séquestration du carbone, mais aussi au regard de la conservation des paysages et de la nature, l'atténuation de l'érosion des sols, la protection de l'eau et de l'héritage culturel. Cependant, ces services publics n'ont pas de prix de marché, sont difficiles à isoler, interagissent hautement de manière dynamique et complexe et sont difficiles à mesurer. Les liens forts entre la production de figuier de Barbarie et la fourniture de divers biens et services écosystémiques, spécialement dans les zones marginales, doivent être considérés et intégrés dans un cadre d'évaluation standard pour les impacts environnementaux de la production agricole. **L'objectif principal de ce chapitre est de mettre en valeur les bénéfices générés par le figuier de Barbarie.**



AMÉLIORATION DES PÂTURAGES

L'amélioration des pâturages en utilisant les cactus inermes a été pratiquée depuis le début des années 1930-1940, principalement en Afrique du Nord. Le Houérou (2002) a rapporté que les plantations de fourrage étaient systématiquement développées, spécialement en Tunisie, à la suite des recherches conduites par Griffiths et ses collaborateurs au Texas aux Etats-Unis d'Amérique. Griffiths a été invité par le gouvernement de Tunisie en 1932 et ses 30 années d'expériences avec l'utilisation du cactus comme fourrage ont depuis été appliquées dans le centre de la Tunisie pour atténuer les effets de la sécheresse sur le bétail. Le développement du cactus pour le fourrage a été fortement soutenu par le gouvernement. Les attributions sous conditions des terres ont été autorisées en Tunisie centrale sous la réserve que les contractants bénéficiaires plantent 10% des terres allouées avec du cactus inermes. Cela devait servir de réserve de fourrage sur pied en cas d'urgence, ce qui ferait office de stock-tampon durant

les périodes de pénuries de fourrage. Cela a été une décision stratégique puisque le pays a fait face à trois années de sécheresse sévère de 1946 à 1948 pendant laquelle 70 à 75% du bétail a été décimé. Les pertes de bétail ont été plus faibles pour ceux qui avaient des plantations de cactus (Le Houérou, 2002).

La plantation de cactus est applicable dans de nombreux contextes, particulièrement là où l'environnement est trop limité ou difficile pour les cultures agricoles traditionnelles ou bien là où la terre a besoin d'être réhabilitée. Le cactus est recommandé partout où les sols sont trop superficiels, trop pierriers, trop pentus ou sableux, ou quand le climat est trop sec pour pratiquer l'agriculture. En conséquence, ils ont un rôle clé dans les stratégies de réhabilitation pour améliorer les pâturages, les brousses, les bushes et les zones agricoles pauvres. Pour la réhabilitation, la densité de plantation est de 1 000 à 2 000 raquettes simples ou doubles par hectare, avec un espacement de 5 à 7 m entre les rangs et 1 à 2 m sur le rang. La fertilisation, la taille et les traitements contre les ravageurs et maladies ne sont généralement pas appliqués, mais ils peuvent l'être de manière à améliorer la productivité. Occasionnellement, si la première année est trop sèche, l'irrigation complémentaire est apportée pendant la mise en place. Les plantations sont exploitables après 3-4 ans et totalement développées après 7-10 ans; elles peuvent rester productives pendant plus de 50 ans quand elles sont bien gérées. Puisqu'*Opuntia* peut survivre avec une gestion minimale, il est recommandé dans les programmes de réhabilitation.

La gestion intensive n'est pas un prérequis pour la survie du cactus, mais une plantation peut atteindre des niveaux de productivité élevés si les pratiques d'appropriation sont adoptées. La productivité des pâturages plantés avec des cactus peut être augmentée par un facteur de 1 à 10 quand les pâturages sont très dégradés et de 1 à 5 quand les pâturages sont dans de bonnes conditions (Le Houérou *et al.*, 1991). Nefzaoui et El Mourid (2009) ont comparé la productivité des pâ-

turages en Tunisie centrale quand ils ont été réhabilités avec du cactus (*Opuntia ficus-indica*) et des arbustes à croissance rapide (*Acacia cyanophylla*). La réhabilitation avec du cactus (*O. ficus-indica*) a donné des taux de productivité plus élevés que la réhabilitation avec des arbustes à croissance rapide (*A. cyanophylla*) (**Tableau 1**).

Peu d'espèces de plantes sont capables d'augmenter la productivité de la terre aux taux élevés mentionnés ci-dessus, particulièrement dans le cas des terres marginales. Les cactus le peuvent - grâce à leur efficacité d'utilisation des pluies (RUE). En effet, les pâturages Méditerranéens dégradés ont une RUE de 1-3 kg MS ha⁻¹ an⁻¹ mm⁻¹, les pâturages en bonnes conditions montrent une RUE de 4-6, et les pâturages dégradés peuvent avoir une RUE aussi basse que 0.1-0.5 (Le Houérou, 1984). En revanche, dans les zones arides avec des précipitations annuelles de 200 à 400 mm, la réhabilitation des pâturages avec l'*Opuntia ficus-indica* montre une RUE de 10 à 20 kg de MS aérienne ha⁻¹ an⁻¹ mm⁻¹.

ATTÉNUATION DE L'ÉROSION DES SOLS

La dégradation des terres se produit sur tous les continents et affecte les moyens d'existence de millions de personnes, incluant une grande proportion de personnes pauvres dans les terres arides (Nefzaoui *et al.*, 2014). Les zones sèches ayant des déficits annuels d'humidité supérieurs à 50% couvrent approximativement 40% de la surface des terres émergées du globe. Plus de 70 % de toutes ces zones sèches souffrent de la désertification, ce qui représente actuellement 36 millions de km² (Winckler, 2002). L'eau et le sol sont les plus précieuses ressources naturelles renouvelables. La prévention de la sécheresse et les stratégies pour s'en sortir sont impératives: par exemple, choisir des cultures tolérantes à la sécheresse, maintenir une faible densité de plantes et mettre en place des actions de conservation et de collecte de l'eau. Cependant, seule une petite fraction des précipitations devient de l'hu-

TABLEAU 1 Productivité (unité de fourrage par hectare) de parcours naturels et améliorés en Tunisie (Nefzaoui et El Mourid, 2009)

Type de pâturage	Productivité (unité de fourrage par hectare) ^a
Parcours naturel à Dhahar Tataouine, Tunisie (100 mm de précipitations)	35-100
Parcours privé amélioré avec une culture de cactus à Ouled Farhane, Tunisie (250 mm de précipitations)	00-1 000
Parcours coopératif amélioré avec <i>Acacia cyanophylla</i> , Guettis, Tunisie (200 mm de précipitations)	400-500

^a Une unité fourragère est équivalente à l'énergie métabolisable d'1 kg de grains d'orge.



midité du sol utilisable : 1 à 10% de la pluie qui tombe dans les terres sèches fini dans les tissus de la végétation naturelle et des cultures d'importance économique (El Beltagy, 1999). L'érosion hydraulique est accélérée par le travail du sol sur les pentes et les bords de ravins.

Les sols des zones arides et semi-arides sont très sensibles à l'érosion hydraulique (Cornelis, 2006), principalement à cause de la faible couverture par la végétation, la faible teneur en matière organique et la faible résistance aux forces d'érosion. L'importance de l'érosion hydraulique dépend aussi de la texture, de la teneur en eau, de l'évaporation, de la percolation et de la lixiviation. Ces caractéristiques de sol ne sont pas favorables à la résistance du sol à l'érosion hydraulique (D'Odorico et Porporato, 2006). Dans les zones arides et semi-arides, les sols avec peu ou pas de couverture végétale sont exposés à des épisodes de précipitations torrentielles, caractérisées par une courte durée et une forte intensité, et sont sujets à des processus physiques et chimiques qui changent l'état de la couche de surface, tels que la formation d'une croûte de battance ou la compaction du sol. Quand une surface sèche, une couche dure se forme (croûte). Les sols qui forment une croûte sont typiques dans les zones sèches, où la dégradation des sols est induite par la réduction du taux d'infiltration et l'augmentation des ruissellements et du taux d'érosion (Ries et Hirt, 2008). Les zones arides et semi-arides sont des environnements fragiles où la couverture de végétation est rare et les processus d'érosion du sol se produisent rapidement et sévèrement après les pluies. Cependant, même dans de telles conditions, la végétation autochtone a un très important rôle dans la régulation des processus hydrauliques de surface (Vásquez Méndez *et al.*, 2011).

Le contrôle de l'érosion est un autre usage important des figuiers de Barbarie (*Opuntia* spp.) puisqu'ils poussent rapidement et ont de petites racines qui repoussent chaque année pendant la période des pluies à partir de la racine principale. Pendant les périodes sèches, les petites racines meurent, ajoutant ainsi de la matière organique au sol. Avec une teneur en matière organique augmentée, le sol absorbe plus facilement l'eau de pluie. Les *Opuntia* spp. sont utilisés dans des programmes pour éviter l'érosion des sols et combattre la désertification; ils sont très adaptables, poussent dans des sols sévèrement dégradés qui sont inadéquats pour d'autres cultures, et sont idéals pour répondre à l'augmentation du niveau de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique. L'*Opuntia* est aussi un couvert important dans



les zones arides et semi-arides, parce qu'il peut survivre et se répandre dans des conditions de précipitations rares et irrégulières et de températures élevées (Reynolds et Arias, 2001).

Des essais impliquant la plantation de cactus pour des bandes de collecte d'eau, des arrêtes de contour, des structures de contrôle de ravins et le contrôle biologique de ravines et de petits ravins ont eu de bons résultats. Les arrêtes de contour consistent en des lignes de pierres parallèles construites 5 à 10 m les unes des autres pour éviter que le ruissellement de l'eau (et du sol qu'elle transporte) n'endommage les zones en contrebas. Chaque arrête collecte le ruissellement de la zone située immédiatement en amont/au-dessus, qui est canalisé vers une petite plantation d'arbustes fourragers ou de cactus. Avec une combinaison d'arrêtes bien conçues et de cactus, les fermiers peuvent produire une grande partie de leurs besoins en fourrage. En Afrique du Nord, particulièrement en Tunisie, le cactus est associé avec succès à des structures de collecte d'eau. Plantées selon les courbes de niveau, les haies de cactus jouent un rôle majeur dans le contrôle de l'érosion (**Figure 1**). Les propriétés physiques du sol et la teneur en matière organique sont considérablement améliorées sous ces haies et dans les zones adjacentes, avec une amélioration de la matière organique et de l'azote en comparaison avec les champs non-traités. Des taux de 40 à 200% d'augmentation de la matière organique et de l'azote ont été rapportés. La stabilité structurale du sol de surface est améliorée, la sensibilité à la battance, le ruissellement et l'érosion sont réduits, et la perméabilité et la capacité de stockage

Figure 1
Gestion en Tunisie pour la protection d'une réserve d'eau.

d'eau sont augmentées. Les terres marginales ont été réhabilitées à faible coût en Tunisie et en Algérie par la plantation de cactus suivant les courbes de niveau (Nefzaoui *et al.*, 2011).

En comparant différents systèmes de culture, tels que la plantation dans le sens de la pente, la plantation en courbes de niveau, la réduction du désherbage, et l'association de culture avec des haies de contour, on a trouvé que les pertes de sol (0.13-0.26 tonnes ha⁻¹ an⁻¹) sont plus faibles avec les haies de contour. La plantation de cactus en haies de contour peut aider à retenir jusqu'à 100 tonnes de sol ha⁻¹ an⁻¹. Des expériences conduites au Brésil et en Tunisie montrent clairement que planter des cactus dans un système agroforestier est plus efficace pour la préservation du sol et de l'eau que l'utilisation conventionnelle de la terre (**Tableau 2**) (Margolis *et al.*, 1985).



L'occurrence d'énormes tempêtes de poussière dans le Sahara peut déplacer 66 à 220 millions de tonnes de sédiments fins chaque année. L'érosion éolienne est une cause majeure de dégradation des sols des terres agricoles dans les zones arides et semi-arides tout autour du monde. Le vent endommage le sol en enlevant les composants du sol les plus légers, les plus fertiles et les moins denses, tels que la matière organique, l'argile et le limon. La réduction de la productivité du sol n'est pas le seul impact agricole de l'érosion éolienne. Les sédiments en suspension coupent et abrasent les plantes, réduisent la survie et la croissance des plantules, diminuent le rendement des cultures et peuvent augmenter la sensibilité aux maladies et la diffusion des pathogènes des plantes (Northcutt, 2001). Sur les terres arides sujettes à l'érosion éolienne, les cactus plantés seuls comme barrière biologique ou avec une barrière physique sont une manière simple, bon marché et efficace d'éviter et de contrôler les pertes de sol et cela facilite l'accumulation de dépôts transportés par le vent.

Les résultats quelques peu dispersés obtenus à ce jour sont les témoins du manque de recherche dans ce domaine. Les actions de développement sont principalement basées sur des hypothèses et des observations rassemblées par des professionnels (Nefzaoui et El Mourid, 2010).

Beaucoup d'espèces de Cactaceae vivent dans des environnements arides et sont extrêmement tolérants à la sécheresse. Une technique de survie d'*O. microdasys* (Lehm.) Pfeiff., originaire du désert de Chihuahua, repose sur son système unique et efficace de collecte du brouillard, attribué à l'intégration de ses structures de surface à plusieurs niveaux (Ju *et al.*, 2012 ; Bai *et al.*, 2015). Ce système comprend des groupes d'épines coniques et de trichomes, bien répartis sur la tige du cactus; chaque épine contient trois parties intégrées, chacune avec un rôle différent dans la collecte du brouillard, en fonction de leurs caractéristiques structurales de surface. Le gradient de pression de Laplace, le gradient de densité surfacique d'énergie et l'intégration multifonction fournissent une collecte efficace du brouillard. Il y a aussi des signes que quelques espèces de cactus peuvent récolter la rosée sur leurs tiges et épines (Malik *et al.*, 2015).

L'*Opuntia* peut tolérer la sécheresse dans les espaces ouverts en augmentant et déplaçant les chloroplastes et en évitant la diminution drastique de leur potentiel osmotique (Delgado Sánchez *et al.*, 2013). *O. ellisiana* Griffiths est une plante CAM, et son efficacité de conversion de l'eau en matière sèche est plusieurs fois supérieure à celle des plantes C3 ou C4. Une quantité significative d'eau (17 mm = 170 000 kg ha⁻¹) peut être stockée dans ce cactus et utilisée comme eau d'abreuvement des animaux (Han et Felker, 1997). Le cactus peut tirer avantage des pluies les plus légères, parce que ses racines sont proches de la surface du sol. L'eau est rapidement collectée par les racines et stockée dans les tiges épaisses et extensibles. Les tiges charnues

TABLEAU 2 Comparaison de perte de sol (tonnes ha⁻¹ an⁻¹) sous différentes cultures dans le nord-est du Brésil semi-aride (Margolis *et al.*, 1985)

Type de culture	Phase de préparation du sol	Phase de culture	De la récolte à la saison suivante de culture	Pertes totales de sol	Facteur C
Sol nu	7.19	8.2	13.71	29.1	1
Coton	2.42	1.77	6.72	10.91	0.392
Maïs	1.51	0.68	3.75	5.94	0.199
Maïs + Haricots	1.36	0.55	2.02	3.93	0.119
<i>Opuntia ficus-indica</i>	0.48	0.02	1.48	1.98	0.072
Graminée pérenne	0	0.02	0.01	0.03	0.001

du cactus tonneau (*Ferocactus wislizeni* Britton & Rose) sont plissés comme un accordéon et ils se replient avec l'utilisation de l'eau. Les tiges vertes produisent la nourriture de la plante, mais elles perdent moins d'eau que les feuilles, grâce à leurs pores encastrés et à la couche cireuse sur la surface de la tige. Les pores se ferment pendant la journée et s'ouvrent la nuit et libèrent donc seulement une petite quantité d'humidité. Le prix payé par les cactus pour ces adaptations d'économie d'eau, est la croissance lente (Zemon, 2015).

Il y a un besoin urgent d'améliorer les activités de recherche en cours avec des initiatives saines de recherche pour étudier tous les bénéfices possibles et l'efficacité de nouvelles technologies en utilisant les cactus comme espèce clé pour aider à contrôler la désertification et à s'adapter au réchauffement climatique (Nefzaoui et El Mourid, 2010).

CLÔTURE BIOLOGIQUE/BARRIÈRES VÉGÉTALES

Le figuier de Barbarie peut être cultivé en haies et clôtures en les plantant séparés d'environ 30 cm. Dans plusieurs années, les plantes poussent ensemble pour former un mur de raquettes épineuses saillantes dans tous les angles. La plantation peut aussi être mise en place pour le contrôle de l'érosion dans les zones déforestées. Avec le temps, les cactus tels qu'*O. ficus-indica* peuvent pousser devenant des plantes de 3-6 m de haut produisant librement des branches (University of California Cooperative Extension, 1989). L'utilisation de diverses espèces de cactus pour les clôtures a de grands avantages qui vont bien au-delà des économies faites en n'ayant pas à utiliser des moyens coûteux tels que le fer. Une fois créée, une clôture vivante fournit des fruits et une excellente protection pour les maisons et les cultures, tout en procurant des abris et habitats pour les espèces de la faune sauvage. Les cerfs et ses principaux prédateurs peuvent sauter par-dessus ou se faufiler à travers des tunnels naturels. Aussi, si on lui donne une quantité raisonnable d'eau, le cactus peut croître rapidement et -puisque la plupart des fermes et des maisons ont de l'eau - une clôture peut être établie en 1 an. Plus les raquettes sont plantées proches, plus la clôture se ferme rapidement, mais, plus tard, un travail difficile de taille devient nécessaire. Une fois établie, une barrière de cactus fournit de la sécurité, de belles fleurs (qui attirent les abeilles et autres insectes) et des fruits. Chaque variété devrait être sélectionnée pour son aisance de manipulation et sa saveur, puisque certaines ont trop de graines. Une variété épineuse de figuier de Barbarie *Opuntia* standard fait une bonne clôture; et les variétés inermes ne vont pas garder les humains à distance si le manque d'épines peut être vu de loin.

L'*Opuntia violacea* Engelm var. *santa-rita* (Griffiths & Hare) L. D. Benson qui tire vers le bleu fait une excellente clôture - le fruit est rouge betterave, rempli de grains et n'a presque pas de pulpe comestible; il a aussi des épines épaisses groupées sur le fruit. Pour faire une clôture, couper les raquettes les plus épaisses d'une plante, laisser guérir la coupure pendant environ une semaine et puis planter les raquettes à 1.3 m les unes des autres. Cependant, s'il y a peu de temps disponible, placer les raquettes à plat sur le sol le même jour et les laisser une année ou deux; elles constituent une forme conique et retiennent l'eau de pluie. Si cette dernière méthode est adoptée, les raquettes très épaisses et ligneuses sont les meilleures (White Dove Farm, 2015).

Les cactus épineux *O. ficus-indica* var. *amyclaea* (Ten.) A. Berger and var. *elongata* Shelle sont souvent utilisés comme haies défensives pour la protection des jardins, des vergers et des bosquets d'oliviers à travers l'Afrique du Nord et dans des zones d'Italie et d'Espagne. Ces haies marquent les limites tout en aidant à contrôler l'érosion. Cependant, dans les régions où les hivers sont tempérés à doux (température journalière minimale moyenne en janvier supérieure à 3°C), les fruits des haies d'*Opuntia* peuvent abriter la mouche du fruit, *Ceratitis capitata* L. Les cactus portant des fruits peuvent, par conséquent, avoir besoin d'un traitement contre la mouche du fruit ou d'être éliminés des zones de cultures d'autres fruits. Cependant, dans le cas des cactus à fourragers, s'ils sont récoltés tous les 2-3 ans, ils ne produisent pas de fruits et ne peuvent pas par conséquent être hôtes de la mouche du fruit. Non seulement ces haies ont un rôle défensif très efficace (particulièrement quand elles sont mises en place en double rang), mais elles jouent aussi un rôle important dans l'organisation du paysage et dans l'économie sociale locale, définissant les droits sur ces terres et la propriété de la terre dans des pays ou des régions où aucun registre des terres n'existe. Les haies de cactus sont souvent plantées comme témoignage de possession de la terre parce que dans certains pays, les traditions disent que les terres tribales peuvent devenir la propriété de quiconque qui, parmi les utilisateurs légitimes, a établi dessus une culture permanente. C'est une forte motivation pour planter des haies de cactus (et des bosquets d'oliviers) sur les terres communautaires, et cela explique leur popularité dans des pays tels que la Tunisie. Les haies de cactus jouent aussi un rôle majeur dans le contrôle de l'érosion et dans le fractionnement des terres en pente, particulièrement quand elles sont mises en place suivant les courbes de niveau. Les propriétés physiques du sol et la teneur en matière organique sont considérablement améliorées sous les haies et dans les zones immédiatement adjacentes (Monjauze et Le Houérou, 1965b). Les agrégats dans la terre de surface deviennent plus stables et moins sensibles à la battance, au ruissellement et à l'érosion; la perméabilité



et la capacité de rétention de l'eau augmentent. De plus, les haies sont des obstacles physiques aux ruissellements: elles aident à accumuler les ruissellements locaux temporairement et l'engorgement et évitent l'érosion régressive. Quelques terres infertiles, développées sur les affleurements de pentes schisteuses et caillouteuses/rocailleuses, ont été réhabilitées à faible coût en Tunisie et en Algérie avec la plantation de cactus suivant les courbes de niveau. Dans les terres arides sujettes à l'érosion éolienne, les haies de cactus sont une manière efficace, facile et peu chère pour éviter et contrôler les pertes de terre superficielle et aider l'accumulation de sédiments transportés par le vent (Le Houérou, 1996a).

Le coût de mise en place d'une clôture dépend du matériel utilisé. Une clôture métallique (quatre fils de fer barbelé) coûte environ 1 \$US par mètre, c'est-à-dire 150 \$US par hectare en Tunisie pour des plantations d'environ 10 ha. Une clôture faite d'un double rang de cactus épineux coûte moins de 60 \$US par hectare, mais devrait être mise en place au moins deux ans avant qu'elle entre en fonction (Le Houérou, 1989).



POTENTIEL DE SÉQUESTRATION DU CARBONE

Au cours des quatre dernières décennies, il est devenu évident que l'augmentation du CO₂ atmosphérique due à la consommation d'énergies fossiles est en train de causer l'augmentation de la variabilité du climat. Cela mène à d'importants problèmes associés au réchauffement climatique et aux régimes de précipitations continentales modifiés qui ont déjà un effet sur la distribution des espèces et des fonctions dans la biosphère des plantes (Walther *et al.*, 2002 ; Root *et al.*, 2003). Les recherches se sont concentrées sur l'évaluation du potentiel de la séquestration biologique du CO₂ par divers types de plantes. En comparaison avec les plantes C₃ et C₄, les plantes CAM (agaves et cactus) peuvent utiliser l'eau bien plus efficacement en ce qui concerne l'assimilation du CO₂ et la productivité (Nobel, 2009). La production de biomasse par unité d'eau est en moyenne 5 à 10 fois plus grande que pour les plantes C₄ et C₃ (**Tableau 3**). Le potentiel des systèmes CAM pour accumuler une biomasse élevée dépend de leur capacité à allouer plus de glucides pour la croissance que pour le métabolisme acide nocturne (Borland et Dodd, 2002).

Le rôle des plantations de cactus dans le cycle du carbone est extrêmement important. Elles aident à compléter le cycle de vie en recyclant les éléments nutritifs des blocs de construction vers la plante et le carbone (CO₂) vers l'atmosphère (Doran, 2002). Cela est important dans le processus de décomposition du sol et il est souvent réalisé par les organismes du sol. Diverses expériences ont

été réalisées dans différentes régions pour quantifier le potentiel de séquestration du carbone des *Opuntia*. Les mesures des échanges gazeux chez *Opuntia ficus-indica* ont commencées au début des années 1980, quand Nobel et Hartsock (1983) ont mesuré l'assimilation de CO₂ sur des cladodes simples, en utilisant un analyseur infrarouge de gaz portatif avec des chambres adaptées pour correspondre à la morphologie des cladodes. A la température et aux radiations interceptées optimales, les valeurs instantanées d'assimilation nette de CO₂ de cladodes d'un an peuvent atteindre 18 mmol m⁻² s⁻¹, avec une assimilation totale journalière de CO₂ de 680 mmol m⁻² (Nobel et Bobich, 2002). Dans des études similaires - évaluant les effets des variations saisonnières de température, de radiation et de teneur en humidité du sol sur le taux de photosynthèse d'*Opuntia ficus-indica* - Sur cinq dates de mesure, la moyenne de l'assimilation nette journalière de CO₂ était de 393 mmol m⁻², et l'assimilation annuelle de CO₂ était de 144 mol m⁻² (Pimienta Barrios *et al.*, 2000).

Opuntia a une plus grande efficacité d'utilisation de l'eau que les plantes en C₄ et en C₃ grâce à leur voie photosynthétique CAM, qui est plus efficace pour convertir l'eau et le CO₂ en matière sèche de la plante (Nobel, 1991, 1994 ; Han et Felker, 1997 ; Nobel, 2009). Comme formulé par Nobel (2009), les conséquences des échanges gazeux nocturnes dépendent de la température. Les températures sont plus faibles la nuit, ce qui réduit la concentration interne de vapeur d'eau dans les plantes CAM, et engendre une meilleure efficacité d'utilisation d'eau. C'est la raison clé pour laquelle les espèces CAM sont les plantes les plus adaptées aux habitats arides et semi-arides. L'importance de l'ouverture nocturne et de la fermeture diurne des stomates chez les espèces CAM pour la conservation de l'eau a longtemps été reconnue (Black et Osmond, 2003). En plus des avantages d'être une espèce CAM, les plantes d'*Opuntia* sont aussi connues pour leur capacité à se régénérer et à croître facilement. Elles agissent en puits de carbones et peuvent être cultivées à grande échelle dans les zones où les précipitations sont inadéquates ou peu fiables. Elles peuvent pousser là où l'évaporation est tellement grande que les pluies sont inefficaces pour la croissance des cultures (Osmond *et al.*, 2008). Les plantes C₃ et C₄ souffrent de dégâts irréparables une fois qu'elles perdent 30% de leur teneur en eau, alors que beaucoup de cactus peuvent survivre à une perte de 80 à 90% de leur teneur en eau, à l'état hydraté, et continue à survivre. Cela est dû à la capacité des plantes CAM à stocker de grandes quantités d'eau; de déplacer l'eau parmi les cellules et garder le métabolisme crucial actif; et de tolérer une déshydratation cellulaire extrême (Nobel, 2009). Ces capacités, à leur tour, proviennent des caractéristiques des cactus: une cuticule très épaisse offrant une barrière efficace contre

la perte d'eau; la présence de mucilage; et la fermeture diurne des stomates. De plus, les cactus sont caractérisés par le développement asynchrone des différents organes de la plante, pour que même dans les pires conditions, certaines parties de la plante restent non affectées. On sait bien que les cactus poussent dans le désert où les températures sont extrêmement élevées. Plusieurs auteurs (par exemple : Nobel, 2009) rapportent que beaucoup d'agaves et de cactus peuvent tolérer des températures élevées de 60 à 70°C.

Cet aspect est couvert en détail par Nobel (2009). Compte tenu des adaptations phénologiques, physiologiques et structurales spécifiques des cactus décrites ci-dessus, on peut considérer qu'ils sont bien adaptés pour faire face au réchauffement climatique global futur. Par exemple *Opuntia ficus-indica* peut séquestrer du carbone dans 20 tonnes de matière sèche (équivalente à 30 tonnes de CO₂) par hectare et par an dans des conditions de croissance suboptimales similaires à celles des régions arides de l'Afrique du Nord.

Une espèce d'*Opuntia* est connue pour occuper les terres agricoles ouvertes et abandonnées et pour envahir les brousses ouvertes et les forêts. Cela se produit spécialement dans les habitats imprévisibles mais fréquemment humides de l'est de l'Australie centrale qui ne reçoivent pas de précipitations efficaces pour la croissance des cultures agricoles (Leeper, 1960 ; Osmond *et al.*, 1979). La plante a réussi dans son habitat d'adoption pour de multiples raisons: d'une part, parce que c'est une plante CAM avec un potentiel exceptionnel de conservation de l'eau; d'autre part, parce qu'elle peut se concentrer sur l'activité photosynthétique à cause de son ratio racine sur tige extrêmement faible, dominée par la biomasse aérienne des cladodes, elle peut se focaliser sur l'activité photosynthétique; mais par-dessus tout, parce qu'elle est caractérisée par une activité extraordinaire de reproduction végétative et sexuée.

L'augmentation du CO₂ atmosphérique stimule encore plus la croissance et la séquestration du carbone d'*O. ficus-indica* (Gomez Casanovas *et al.*, 2007). Drennan et Nobel (2000) ont rapporté que le doublement du CO₂ atmosphérique a activé l'assimilation totale de CO₂ de 31% en moyenne pour six gros cactus, et a stimulé la croissance et la biomasse de 33%. Ces réponses étaient inattendues parce que l'élévation du CO₂ n'était pas sensée activer l'assimilation de CO₂ en présence de stomates fermés à la lumière; de plus, on s'attendait à ce que l'assimilation du CO₂ dans l'obscurité par la phosphoenolpyruvate carboxylase soit saturée par le CO₂ interne. Cependant ces réponses sont en bon accord avec ce qui est maintenant connu des limitations de la diffusion de la fixation de CO₂ à tous les stades de croissance des espèces CAM (Rascher *et al.*, 2001 ; Nelson *et al.*, 2005 ; Griffiths *et al.*, 2007). Wang et Nobel (1996)

ont trouvé que la croissance d'*Opuntia ficus-indica* sous un taux de CO₂ élevé pendant trois mois, offrait peu de preuves de la régulation négative de la photosynthèse communément rencontrée chez les plantes herbacées. Les plantes herbacées subissent généralement des limites à l'effet de puits et de rétroaction des sucres sur l'assimilation de CO₂ et sur l'expression des gènes. Cependant, chez *O. ficus-indica*, une assimilation plus élevée de CO₂ (capacité de source) a été atteinte avec un plus grand transport de sucrose dans le phloème et une plus forte force de puits. Drennan et Nobel (2000) en ont conclu que les communautés CAM à forte biomasse offrent un potentiel comme système à faible intrants pour la séquestration de CO₂ dans les habitats arides. Bien que plus de recherches soient nécessaires, les plantes CAM à longue vie dans les écosystèmes arides peuvent être des systèmes efficaces de séquestration régionale de carbone à une échelle temporelle allant de la décennie aux siècles.

Les données disponibles sur l'assimilation nette de CO₂ selon les âges des cladodes sont limitées. Liguori *et al.* (2013a) ont utilisé une chambre à échanges gazeux ouverte pour mesurer l'assimilation nette de CO₂ de la plante entière ou d'organes isolés chez le figuier de Barbarie, particulièrement pour comprendre la réponse de la plante entière à un stress environnemental. Contrairement aux résultats sur les cladodes simples, après 60 jours de sécheresse la plante entière a maintenu le même niveau d'assimilation nette de CO₂, bien qu'il y ait eu des pertes d'eau substantielles dans le parenchyme des cladodes les plus actifs pour la photosynthèse. De futures recherches sur l'assimilation de CO₂ des cladodes individuels sont nécessaires pour comprendre les meilleures pratiques de taille pour augmenter l'assimilation de CO₂, particulièrement dans les champs cultivés d'*O. ficus-indica*.



LA CULTURE EN ALLÉE

L'expansion de la culture des céréales dans les pâturages, combinée avec le non-retour des terres à la jachère, est l'une des raisons majeures pour le déclin de la fertilité des sols et l'érosion éolienne. Une manière de combattre la dégradation engendrée par la monoculture de céréales est l'introduction de légumineuses fourragères adaptées, des arbustes/arbres fourragers et de cactus dans le système de culture (Nefzaoui *et al.*, 2011). La culture en allée est une pratique agroforestière où les cultures pérennes sont cultivées simultanément avec une culture annuelle. Les arbustes, les arbres ou les cactus sont cultivés en larges bandes et la culture est installée dans les espaces intermédiaires. La culture en allée est une forme d'association en haies. Les espèces d'arbres/d'arbustes légumineux ayant une croissance



Figure 2
Alley cropping using
Opuntia ficus-indica
and barley crop

rapide sont préférées pour leurs propriétés d'amélioration du sol, c'est-à-dire leur capacité à recycler les éléments nutritifs, à étouffer les adventices et à contrôler l'érosion des terres en pente. Cette technologie permet au fermier de continuer à cultiver la terre pendant que les arbres/arbustes plantés en rangs intermittents aident à maintenir la qualité du sol. Les cactus peuvent fonctionner dans ce système comme brise-vent, engendrant un meilleur rendement d'herbe/céréale. Les larges allées permettent aux animaux de pâturer la strate de biomasse ou les chaumes de céréales pendant l'été; les raquettes de cactus peuvent être récoltées, hachées et données directement aux animaux pâturant comme complément d'énergie des chaumes de faible qualité (Nefzaoui *et al.*, 2011).

Bien que les cactus soient bien connus comme les meilleures plantes pour la reforestation des zones arides et semi-arides grâce à leur résistance aux précipitations rares et erratiques et aux températures élevées, les systèmes de culture en allées en

Tunisie sont un phénomène très récent. Quand elle est correctement gérée la culture en allée peut fournir un revenu à différents intervalles de temps pour divers marchés d'une manière durable et orientée vers la conservation. La conception en allée peut aussi optimiser l'espace disponible entre les arbres, ajoutant de la protection et de la diversité dans les champs agricoles.

La pratique de planter seulement des arbustes n'est pas largement adoptée pour diverses raisons, incluant la conception technique de la plantation, la mauvaise gestion, et la compétition pour la terre souvent dédiée à la culture des céréales. Quelques-uns de ces inconvénients peuvent être surmontés par la culture en allée, qui :

- améliore les sols;
- augmente le rendement ;
- réduit les adventices ;
- améliore les performances animales.

Une culture en allée correctement gérée permet la diversification des productions et les fermiers peuvent bénéficier de plusieurs marchés. Cela améliore aussi la durabilité des productions végétales et animales. Les bénéfices de la culture en allée de cactus et d'orge ont été évalués en Tunisie (Alary *et al.*, 2007 ; Shideed *et al.*, 2007). En comparaison avec l'orge seule, la biomasse totale (grain et paille) de l'orge cultivée entre les rangs des cactus inermes a augmenté de 4.24 à 6.65 tonnes ha⁻¹, alors que le rendement en grains a augmenté de 0.82 à 2.32 tonnes ha⁻¹ (**Tableau 3, Figure 2**). Ces chiffres sont le résultat du micro-environnement créé par la culture en allée avec les cactus, qui installe un brise-vent bénéfique, réduisant les pertes d'eau et augmentant l'humidité du sol. La culture d'orge a stimulé l'augmentation du nombre de cladodes de cactus et de fruits, pendant que le cactus a accru la quantité de racines contribuant à la matière organique du sol.

TABLEAU 3 Changement de biomasse totale et rendements de la culture d'orge (tonnes ha⁻¹) à Sidi Bouzid (Tunisie)^a (Alary *et al.*, 2007)

Traitement	Parcours naturel	Culture d'orge (seule)	Culture de cactus (seule)	Culture en allée (cactus + orge)
Biomasse aérienne (tonnes ha ⁻¹)	0.51	0.53	1.87	7.11
Biomasse racinaire (tonnes ha ⁻¹)	0.33	0.11	1.8	1.98
Rendement en grains d'orges (tonnes ha ⁻¹)	1.51	0.82		2.32
Grains d'orges + paille + adventices (tonnes ha ⁻¹)	1.36	4.24		6.65

^a Les précipitations moyennes à Sidi Bouzid sont de 250 mm an⁻¹. Tous les traitements étaient sans engrais.

CONSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ

L'intensification des pratiques agricoles dans le contexte du changement climatique est une cause de préoccupation, puisque cela altère dramatiquement les caractéristiques du sol et affecte les communautés de la flore et de la faune locales (Ouled Belgacem et Louhaichi, 2013). Ces perturbations affectent la biodiversité, le plus important facteur affectant la stabilité des écosystèmes et les agroécosystèmes (Fontaine *et al.*, 2011). L'arrêt ou l'inversement du déclin de la biodiversité est un défi majeur pour la préservation de la biodiversité et des plus larges services écosystémiques.

Les figuiers de Barbarie sont fréquents dans beaucoup d'habitats arides et semi-arides. Ils ont un rôle notoire dans l'écologie et sont importants pour la faune et la flore partageant leur habitat. Padilla et Pugnaire (2006) rapportent que quelques plantes trouvent un bénéfice à être associées de prêt à leur voisin, un phénomène connu comme la facilitation. Le cactus agit souvent comme « plante infirmière » dans les climats chauds: leur ombre et parfois les éléments minéraux associés à leur présence, aident les plantules d'autres espèces à s'établir, ce que ces dernières ne pourraient autrement pas être capables de faire dans les sols chauds ou pauvres. Le cactus peut être une source attractive d'abris pour la faune sauvage et leur ombre est très importante pour les animaux, autant que pour les autres espèces de plantes. Les espèces de cactus fournissent un site de nidification important pour les oiseaux, les rongeurs et autres animaux. Les oiseaux se perchent sur leurs branches pour surveiller les alentours. Les fientes d'oiseaux contiennent souvent des graines d'autres plantes et l'ombre du cactus peut fournir un microclimat favorisant d'autre vie végétale.

Le cactus fournit des fruits et des fleurs pour divers animaux - beaucoup d'espèces d'oiseaux, de chauves-souris et d'insectes, dont les abeilles. Le cactus survit dans l'environnement naturel sans irrigation artificielle et ils produisent la plupart de leurs fleurs et fruits pendant la saison sèche, quand très peu d'autres ressources sont disponibles pour la faune sauvage; de plus, leurs fleurs attirent des papillons et d'autres insectes pollinisateurs. Quelques espèces d'*Opuntia* produisent un fruit juteux en été, apprécié par beaucoup d'oiseaux. Les fruits succulents contenant beaucoup de graines sont très attractifs pour les oiseaux passereaux; pour cette raison, il n'est pas inhabituel de trouver des plantes se développant jusqu'à maturité dans les marges pierreuses, prêt des piquets de clôtures en bois ou le long des lignes de clôture en fil de fer. Les figuiers de Barbarie offrent un bon couvert de protection pour les oiseaux. Par exemple, le troglodyte des cactus (*Campylorhynchus brunneicapillus* Lafresnaye) est originaire du sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique jusqu'au centre du Mexique

pour la partie méridionale. On le retrouve dans les déserts et les contreforts arides caractérisés par des cactus, mesquites, yucca et autres types d'arbustes du désert. Il niche dans les plants de cactus - parfois dans un trou dans un saguaro et ou là où il est protégé par les feuilles épineuses d'un cholla ou un yucca. La construction du nid dans les cactus fourni une certaine protection pour les jeunes, mais les troglodytes utilisent aussi ces nids toute l'année comme perchoirs. Ils mangent principalement des insectes, occasionnellement des graines ou des fruits, mais boivent rarement d'eau, obtenant l'eau à partir de leur nourriture.

Des centaines d'espèces de fourmis utilisent les cactus comme aliment et - avec d'autres insectes - sont d'importants pollinisateurs des cactus. Alors que d'autres prédateurs trouvent les épines intimidantes, les fourmis broutent le long des tiges de cactus, capturent la petite faune et se nourrissent des nectars extra-floral, qui fournit un mélange de sucres ayant souvent une teneur élevée en acides aminés. De plus, les fourmis et les autres insectes qui se nourrissent de graines de cactus jouent un rôle dans la dispersion des graines. Les cactus fournissent un habitat pour plusieurs différents types d'insectes. Les Assassins d'abeilles, *Apiomerus crassipes* Fabricius, patientent dans les fleurs et chassent leurs proies abeilles ou fourmis en leur injectant une enzyme paralysante avec leurs becs semblables à des aiguilles hypodermiques. Les cochenilles insectes, *Dactylopius coccus* Costa, est une espèce cryptique (un taxon qui utilise l'anatomie ou le comportement pour échapper aux prédateurs) et les femelles passent leur vie entière en colonies sur les tiges des figuiers de Barbarie. Cette espèce d'insecte est connue pour la sécrétion d'acide carminique, utilisé par les anciens Aztèques pour produire un colorant pourpre. Des centaines d'espèces de papillons, de papillons de nuit et d'hespéridés sont des pollinisateurs connus des Cactaceae (Hogan, 2015). Les fleurs contiennent de grandes quantités de nectar et les fruits sont riches en eau.

Les cactus sont aussi importants pour beaucoup d'animaux du désert. Les chauves-souris qui se nourrissent de nectar, *Leptonycteris curasoae curasoae* Mill. et *Glossophaga longirostris elongata* Petit et Pors, sont précieuses pour la pollinisation de beaucoup de plantes à Curaçao, et elles dépendent, pour leur survie, des cactus colonnaires. Leur alimentation est constituée principalement de nectar de cactus, de pollen et de fruits quand ils sont disponibles. De plus grands mammifères, tels que le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus* Zimmerman), consomment en fait les raquettes des figuiers de Barbarie, malgré la formidable armure épineuse (Ramawat, 2010). Les raquettes de cactus sont remplies d'eau, utilisées par plusieurs animaux dont le prikichi (la cornure dorée *Aratinga pertinax* L.) et le cerf de Virginie. Les coyotes (*Canis latrans* Say) se

nourrissent dans un habitat semi-désertique d'herbes et de buissons et consomme une variété d'aliments tout au long de l'année. Beaucoup d'espèces de cactus dans le désert de Sonoran portent des fruits pendant l'été - une source importante d'aliment pendant les mois les plus secs. Les coyotes se nourrissent de fruits de cactus quand ils sont mûrs, comme cela a été montré par l'analyse des fèces collectés en automne (Short, 1979). En Arizona, le genre *Neotoma*, aussi connus comme le rat américain, vivent principalement dans le désert sur des cactus tombés et des piles de débris. Ils creusent des tunnels sous un cactus (généralement un figuier de Barbarie), détruisant les racines et provoquant la chute du cactus par-dessus. Cela crée une tanière blindée d'épines relativement protégée des mammifères et des oiseaux prédateurs. Quelques espèces occupent la base d'un figuier de Barbarie comme site pour leur tanière, utilisant les épines de cactus pour la protection contre les prédateurs.



Malheureusement, l'habitat fourni par les cactus n'est pas toujours bénéfique ou agréable pour les humains. En conséquence, pendant les mois d'été beaucoup d'exploitants brûlent les cactus pour les éliminer de leurs champs. Alors que les cactus sont souvent considérés comme une adventice invasive dans la majeure partie du sud des Etats-Unis d'Amérique, la présence de beaucoup d'espèces d'*Opuntia* a été en fait documentée par les premiers colons dans la région. Aussi au Mexique, la plante est souvent considérée comme une adventice, mais c'est une source importante de nourriture dans la culture Mexicaine. Les raquettes de cactus sont récemment devenues une tendance santé et elles sont vendues comme un légume dans plusieurs supermarchés des Etats-Unis d'Amérique. On espère que son utilisation comme aliment va mettre en valeur l'importance de la plante; cependant beaucoup doivent encore réaliser son importance écologique pour la biodiversité.

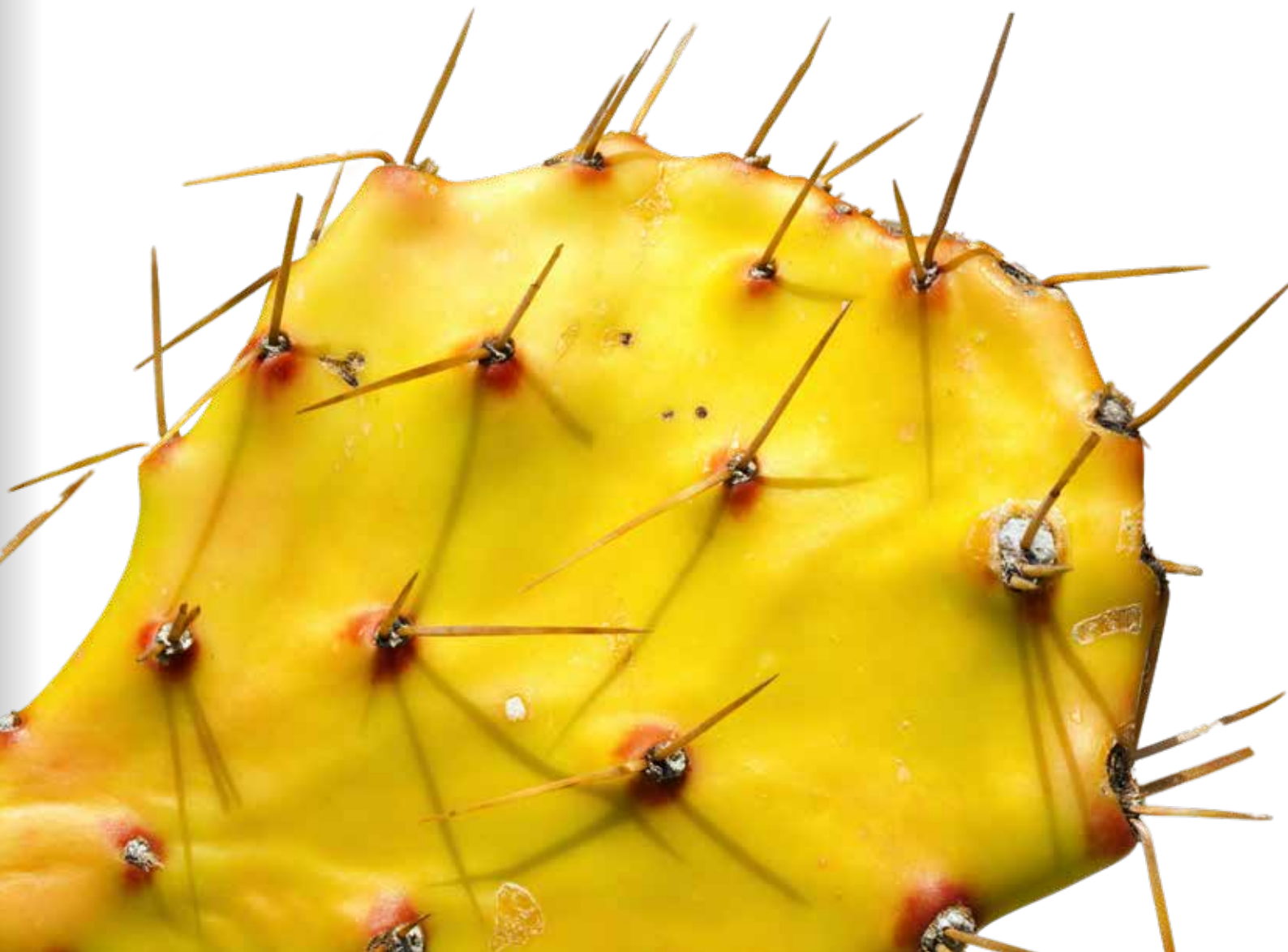
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les sociétés humaines extraient beaucoup de biens et de services essentiels des écosystèmes naturels. Ce chapitre se concentre sur l'importance du figuier de Barbarie et ses rôles significatifs dans les moyens de subsistance des fermiers. Les biens et services fournis par les figuiers de Barbarie incluent : le contrôle des sols et de l'érosion hydraulique; la régulation du climat via la séquestration du carbone; la conservation de la biodiversité; des habitats pour la faune sauvage; des bénéfices industriels et pharmaceutiques - en plus de leur beauté esthétique comme plante toujours verte. Malgré leur importance sociale, écologique et économique, les cactus reçoivent une attention scientifique et médiatique limitée et il n'y a pas suffisamment de préoccupation sur les bienfaits de leur conservation. Ceci est largement dû aux connaissances limitées et à la vision étroite se concentrant sur les cactus pour la production de fruits et de fourrage. Un changement majeur dans le rôle des cactus et leur production est nécessaire, vers un concept plus large de biens et services écosystémiques. Une **approche holistique** est nécessaire, avec un équilibre entre la préservation de l'environnement, la production des systèmes agricoles et le développement socio-économique. Ce serait un grand gain de promouvoir les bénéfices écologiques, économiques et sociaux des cactus et de renforcer les capacités techniques des ressources humaines dédiées à ces espèces. En plus de l'analyse des tendances actuelles de la recherche, il est vital de présenter de nouvelles découvertes et de planifier les futures recherches dans tous les domaines concernant le cactus. Des politiques publiques et des crédits sont essentiels de manière à étendre la culture de cette plante importante dans les régions arides et semi-arides du monde.

Invasion globale des cactus: contrôle, gestion et conflits d'intérêt

Helmuth Zimmermann

Helmuth Zimmermann et Associés, Pretoria, Afrique du Sud



INTRODUCTION

La valeur du figuier de Barbarie, *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., est incontestable (Barbera *et al.*, eds, 1995 ; Mondragón Jacobo et Pérez González, 2001 ; Nobel, ed., 2002 ; Sáenz *et al.*, eds, 2006) et il y a eu des efforts considérables pour introduire avec un certain succès cette culture émergente dans plusieurs pays en développement (De Waal *et al.*, 2015). La valeur du figuier de Barbarie comme source de fourrage a presque surpassé sa valeur comme culture fruitière. Néanmoins, plusieurs pays - dont des pays en développement de l'Afrique sub-Saharienne - doivent encore adopter sérieusement cette nouvelle plante, par exemple, le Botswana, la Namibie, l'Angola, le Zimbabwe, le Mozambique, la République Unie de Tanzanie et la Zambie. Le figuier de Barbarie reste une culture émergente sous-utilisée avec de nombreuses utilisations potentielles. Récemment, d'autres cactus cultivés, pour le commerce, gagnent aussi en popularité, par exemple : *Nopalea cochenillifera* (L.) S-D, *O. undulata* Griffiths (Brésil) (Cordeiro dos Santos et Gonzaga de Albuquerque, 2001), *O. monacantha* Haw. (Kaufmann, 2001), *Hylocereus undatus* (Haworth) Britt. & Rose et *Cereus hildmannianus* KSch (= *C. peruvianus*) (Israël) (Nerd *et al.*, 2002). Malheureusement, les espèces de cactus ayant une valeur commerciale (incluant *O. ficus-indica* et *O. monacantha*) sont devenues invasives dans plusieurs pays (Novoa *et al.*, 2016) engendrant des tentatives bien connues de les gérer et de les limiter (Kaufmann, 2001 ; Zimmermann et Moran, 1982).

Au cours des 50 dernières années, il y a eu une augmentation du nombre d'espèces invasives, particulièrement au sein de la sous-famille des Opuntioideae, mais plusieurs nouveaux envahisseurs émergents des sous-familles des Cactoideae et Pereskioideae sont aussi apparus, amenant le nombre total d'espèces invasives rapportées à environ 57 (Novoa *et al.*, 2016). Le nombre d'espèces invasives en Afrique du Sud a augmenté de 13 (tous les *Opuntiae*) en 1947 à 35 en 2014, dont au moins 8 espèces de Cactoideae. Quelques espèces invasives d'*Opuntia* ont nécessité des mesures de contrôle drastiques par exemple un contrôle chimique, habituellement suivi par un contrôle biologique quand les méthodes de contrôle conventionnelles se sont révélées inefficaces (Petty, 1948 ; Annecke et Moran, 1978 ; Moran et Annecke, 1979 ; Zimmermann et Mo-

ran, 1982). La forme épineuse d'*O. ficus-indica*, connue sous le nom de figuier de Barbarie, et deux *Opuntia* envahissants nouvellement enregistrés, à savoir : *O. robusta* Pf et *O. engelmannii* S-D, sont actuellement considérés, principalement comme source de fourrage, partiellement pour réduire l'infestation, mais surtout pour en tirer des bénéfices d'une grande ressource inexploitée (Felker, 1995). Par le passé, il y a eu des conflits d'intérêt basés sur une perception, vraie ou fausse, du figuier de Barbarie comme espèce invasive ou bénéfique, engendrant des retards dans la mise en place de programmes de contrôle biologique. Au regard de l'importance des *Opuntiae* cultivés commercialement, l'autorisation de lâcher des agents de contrôle biologique pertinents n'aurait pas été accordée aujourd'hui, avec des conséquences directes sur les projets futurs de contrôle biologique des nouvelles espèces émergentes dans les deux sous-familles.

Ce chapitre donne une vue historique d'ensemble des cactus invasifs des trois sous-familles Opuntioideae, Cactoideae et Pereskioideae - selon la taxonomie d'Anderson (2001) et Hunt (2006) - et le contrôle de ces envahisseurs, en se concentrant sur les nouvelles approches pour surmonter le problème de plus en plus important des conflits d'intérêts. La densification des cactus, qui sont devenus des adventices dans leur habitat naturel en Amérique, n'est pas incluse dans cette discussion.

LES CACTUS COMME UN PROBLÈME

Malgré des informations disponibles limitées, une tentative a été faite pour identifier les principales espèces de cactus invasifs, l'étendue de l'invasion, leurs origines, leur utilisation et leur gestion (s'il y en a). Cette information est résumée dans les **Tableaux 2 et 3**. Les perceptions des *Opuntiae* cultivés et invasifs, et comme celles-ci sont liées à la gestion des espèces problématiques et à l'acceptation du figuier de Barbarie comme nouvelle culture émergente, sont aussi présentées. Les solutions sont alors proposées pour atteindre des options acceptables de gestion.

Au sein de la sous-famille des Opuntioideae, les genres *Cylindropuntia* et *Opuntia* comportent la plupart des envahisseurs en-dehors des Amériques; ils sont confinés principalement à l'Australie et à l'Afrique sub-Saharienne (**Tableau 1**).



Parmi les Opuntioideae, le genre *Opuntia* compte de loin le plus d'envahisseurs; ils sont détaillés dans le **Tableau 2**. Au moins 37 pays en dehors des Amériques ont réellement signalé des Opuntiae invasifs, mais de faibles invasions sont en train d'émerger dans beaucoup plus de pays, par exemple dans de nombreuses îles et pays en développement en Afrique. Le **Tableau 3** liste les cactus invasifs des sous-familles des Cactoideae et Pereskioideae; en comparaison avec les Opuntioideae, il y en a moins, mais le nombre d'espèces invasives signalées a néanmoins régulièrement augmenté au cours de la dernière décennie. Seules 8 espèces de Cactoideae étaient signalées en 1984 (Moran et Zimmermann, 1984b), par rapport à 18 en 2015. De nouvelles sérieuses invasions peuvent être attendues de ce groupe.

Selon Moran et Zimmermann (1984b), 46 cactus adventices étaient signalés globalement en 1983 - comptant

pour 42 si les dernières classifications taxonomiques de Hunt (2006) et Anderson (2001) sont adoptées. En 2014, sur environ 1922 espèces de cactus reconnues, 57 étaient signalées comme invasives (Novoa *et al.*, 2014). Le chiffre est aujourd'hui de 58, mais il reste une sous-estimation grossière puisque seul un petit nombre de pays en développement a un inventaire des cactus invasifs. L'Afrique du Sud et l'Australie sont des zones sensibles à l'invasion avec, respectivement, 35 et 27 espèces signalées comme invasives (Novoa *et al.*, 2014). Entre 1947 et 2014, 24 cactus envahissants ont été listés en Afrique du Sud (Petty, 1948 ; Anon., 2014). Même les envahisseurs établis ont considérablement étendu leur zone et sont maintenant invasifs dans beaucoup d'autres pays, avec des invasions sérieuses signalées en Chine, Italie, Espagne, Portugal, Arabie Saoudite, Ethiopie, Yémen et en France (Novoa *et al.*, 2014). De nombreux cactus envahissants notoires sont

TABLEAU 1 Cactus invasifs par genre de trois sous-familles et par pays où une invasion sérieuse a été enregistrée.

Genres dans Opuntioideae	Pays où ils sont invasifs	Nombre total d'espèces dans le genre	Nombre d'espèces invasives
<i>Austrocylindropuntia</i>	Australie, Kenya, Namibie, Afrique du Sud, Espagne, Italie, France	11	2
<i>Corynopuntia</i>	Australie	14	1
<i>Cylindropuntia</i>	Australie, Botswana, Israël, Kenya, Namibie, Espagne, Zimbabwe	33	8
<i>Opuntia</i>	Angola, Algérie, Australie, Autriche, Iles Canaries, Chine, Croatie, République Tchèque, Erythrée, Ethiopie, France, Allemagne, Ghana, Inde, Kenya, Madagascar, Ile Maurice, Maroc, Namibie, Nouvelle-Zélande, Iles du Pacifique, Portugal, Réunion, Arabie Saoudite, Somalie, Spain, Sri Lanka, Afrique du Sud, Swaziland, Suisse, République Unie de Tanzanie, Tunisie, Uganda, Yémen, Zimbabwe	181	27
<i>Tephrocactus</i>	Australie, Afrique du Sud	6	1
Genres dans Cactoideae	Pays où ils sont invasifs	Nombre total d'espèces dans le genre	Nombre d'espèces invasives
<i>Acanthocereus</i>	Australie	6	1
<i>Cereus</i>	Australie, Afrique du Sud, Namibie	34	3
<i>Harrisia</i>	Australie, Afrique du Sud, Namibie	20	4
<i>Hylocereus</i>	Australie, Afrique du Sud, Chine, Espagne, îles du Pacifique, Nouvelle-Zélande, Portugal	18	4
<i>Echinopsis</i>	Australie, Afrique du Sud	128	3
<i>Myrtillocactus</i>	Afrique du Sud	4	1
<i>Peniocereus</i>	Afrique du Sud	18	1
<i>Selinicereus</i>	Îles du Pacifique	28	1
Genres dans Pereskioideae	Pays où ils sont invasifs	Nombre total d'espèces dans le genre	Nombre d'espèces invasives
<i>Pereskia</i>	Îles du Pacifique	17	1
Totaux		518	58



TABLEAU 2 Principaux Opuntioideae étrangers invasifs: origine, pays d'invasion, utilisation, statut et gestion

Espèces et origine	Pays où elle a été introduite et où elle est invasive	Utilisation	Statut invasif	Gestion	Références clés
Genre: <i>Austrocylindropuntia</i>					
<i>A. cylindrica</i> (Lam.) Backeb. Equateur, Pérou	Australie	Non utilisé	Envahisseur émergent	Contrôle chimique	Chinnock, 2015
	Afrique du Sud	Ornementale populaire dans les jardins			
<i>A. subulata</i> (Muehlenpf.) Pérou, Bolivie	Australie Kenya Namibie Afrique du Sud Espagne	Largement utilisé comme clôture vivante	Sérieux au Kenya Envahisseur émergent dans les autres pays	Contrôle chimique	Chinnock 2015 Walters <i>et al.</i> , 2011
Genre: <i>Opuntia</i>					
<i>O. aurantiaca</i> Lindl. Argentine, Uruguay	Australie	Non utilisé	Envahisseur sérieux	Biocontrôle correct	Hosking <i>et al.</i> , 1988 Zimmermann et Moran, 1982
	Afrique du Sud	Non utilisé	Envahisseur sérieux	Biocontrôle correct	
	Zimbabwe	Non utilisé	Statut inconnu	Aucun	
<i>O. cordobensis</i> Speg. (= <i>O. ficus-indica</i>) Argentine	Hawaii	Non utilisé	Insignifiant	Bon biocontrôle	
<i>O. elatior</i> P. Miller Colombie, Venezuela, Panama	Australie Indonésie Kenya	Utilisé comme clôture vivante au Kenya	Problématique seulement au Kenya avec une population en croissance	Bon b à l'exception du Kenya où il est encore une adventice	Rao <i>et al.</i> , 1971 Hosking <i>et al.</i> , 1988
<i>O. elata</i> Link & Otto ex S-D Argentine, Uruguay	Australie	Non utilisé	Commence à être de plus en plus invasif en Afrique du Sud	Un peu de biocontrôle	Walters <i>et al.</i> , 2011
	Afrique du Sud			Pas de contrôle	
<i>O. engelmannii</i> S-D ex Eng. (six varieties recognized) USA, Mexique	Australie Caraïbes Ethiopie ? Afrique du Sud (Les variétés <i>engelmannii</i> et <i>lindheimeria</i> sont invasives)	Non utilisé dans les pays envahis Utilisé au Mexique et aux USA comme aliment du bétail	Envahisseur sérieux dans quelques pays	Biocontrôle inadéquat en Afrique du Sud Gestion inconnue dans les autres pays <i>C. cactorum</i> a un impact dans les Caraïbes	Moran et Zimmermann, 1984b Winston <i>et al.</i> , eds, 2014
<i>O. ficus-indica</i> (L.) Mill. (variété de figue de Barbarie épineuse) Mexique	Hawaii Afrique du Sud Australie Ethiopie Erythrée Arabie Yémen	Très utilisée en Afrique du Sud, Ethiopie, Erythrée, Yémen	La perception de la nuisibilité varie Les conflits d'intérêts prévalent	Biocontrôle efficace en Afrique du Sud, à Hawaii et en Australie seulement. Adventice sérieuse dans les autres pays où un contrôle limité est réalisé	Zimmermann <i>et al.</i> , 2009 Haile <i>et al.</i> , 2002
<i>O. humifusa</i> (Raf.) Raf. Est des USA	Australie Afrique du Sud	Non utilisé	Envahisseur sérieux en Afrique du Sud	Biocontrôle réussi en Afrique du Sud	Majure <i>et al.</i> , 2012b,c Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>O. leucotricha</i> (DC) Mexique	Australie Afrique du Sud	Non utilisé	Envahisseur sérieux en Afrique du Sud	Biocontrôle réussi en Afrique du Sud	Majure <i>et al.</i> , 2012b,c Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>O. microdasys</i> (Lehm.) Pf Mexique	Australie Afrique du Sud	Utilisé seulement comme ornementale	Devenant de plus en plus envahissant	Pas de contrôle	Smith <i>et al.</i> , 2011
<i>O. monacantha</i> (Wild.) Haw. Argentine, Uruguay Brazil	Australie Inde Kenya Sri Lanka Ile Maurice Madagascar Afrique du Sud	Intensivement utilisé à Madagascar seulement	Statut bas depuis le biocontrôle réussi	Biocontrôle réussi partout	Zimmermann <i>et al.</i> , 2009
<i>O. robusta</i> Wndl (variétés épineuses)	Australie	Utilisé comme fourrage en Afrique du Sud	Sérieusement envahissant	Biocontrôle partiellement réussi	De Kock et Aucamp, 1970 Walters <i>et al.</i> , 2011
	Afrique du Sud		La forme épineuse devient invasive		

(suite)



Espèces et origine	Pays où elle a été introduite et où elle est invasive	Utilisation	Statut invasif	Gestion	Références clés
<i>O. salmiana</i> Parm ex Pf	Afrique du Sud	Non utilisé	Petites invasions en Afrique du Sud	Ciblée pour éradication	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>O. stricta</i> (Haw.) Haw. (incluant les sous-espèces <i>stricta</i> et <i>dillenii</i>) Mexique, USA, Caraïbes	Australie Angola Ghana Kenya Ethiopie Madagascar Namibie Inde Sri Lanka Arabie Saoudite Afrique du Sud Yemen	Le fruit est consommé frais par quelques-uns mais est principalement utilisé pour les confiseries, jus et colorants Les cladodes ne sont pas utilisés	Très sérieux envahisseur dans beaucoup de pays	Biocontrôle efficace là où il est mis en place Autres mesures de contrôles trop couteuses	Moran et Zimmermann, 1984b Mann, 1969 Julien et Griffiths, eds, 1998 Zimmermann <i>et al.</i> , 2009
<i>O. streptacantha</i> Lem. Mexique	Australie	Non utilisé	Des petits vestiges de population restent	Bon biocontrôle	Mann, 1970
<i>O. tomentosa</i> Salm-Dyck Mexique	Australie Afrique du Sud	Non utilisé	Des petits vestiges de population restent	Bon biocontrôle	Mann, 1970
Genre: <i>Corynopuntia</i>					
<i>Corynopuntia</i> sp.	Australie de l'ouest	Origine inconnue	Adventice émergente	Contrôle chimique	Chinnock, 2015
Genre: <i>Cylindropuntia</i>					
<i>C. fulgida</i> (Engelm.) F.M. Knuth var. <i>fulgida</i> USA, Mexique	Afrique du Sud Zimbabwe	Clôture vivante	Envahisseur sérieux	Bon biocontrôle	Paterson <i>et al.</i> , 2011
<i>C. fulgida</i> var. <i>mamillata</i> USA	Australie Afrique du Sud Namibie	Ornementale populaire	Envahisseur sérieux	Bon biocontrôle	Paterson <i>et al.</i> , 2011
<i>C. imbricata</i> (Haw.) F.M. Knuth USA, Mexique	Australie Botswana Afrique du Sud Espagne Zimbabwe Namibie	Non utilisé	Envahisseur sérieux	Bio-contrôle modérément efficace	Zimmermann <i>et al.</i> , 2009
<i>C. pallida</i> (Rose) F.M. Knuth (= <i>C. rosea</i>) Mexique	Australie Afrique du Sud	Introduite comme ornementale	Envahisseur sérieux	Contrôle chimique Bio-contrôle en cours d'étude	Walters <i>et al.</i> , 2011 Laguna <i>et al.</i> , 2013
	Namibie Espagne	Non utilisé			
<i>C. kleiniae</i> (DC) Sud des USA, Nord du Mexique	Australie	Non utilisé	Envahisseur émergent	Biocontrôle	Chinnock, 2015
<i>C. leptocaulis</i> (DC) F.M. Knuth Sud des USA, Nord du Mexico	Australie Afrique du Sud	Non utilisé	Invasions limitées	Bon biocontrôle	Zimmermann <i>et al.</i> , 2009
<i>C. prolifera</i> (Eng.) F.M. Knuth Sud des USA, Baja California	Australie	Non utilisé	Envahisseur émergent	Inconnue	Chinnock, 2015
<i>C. spinosior</i> (Eng.) F.M. Knuth Sud des USA	Australie Afrique du Sud	Non utilisé	Envahisseur sérieux en Australie seulement	Contrôle chimique Biocontrôle en cours d'étude	Chinnock, 2015
<i>C. tunicata</i> (Leh.) F.M. Knuth Sud des USA, Nord du Mexique	Australie Afrique du Sud Espagne	Non utilisé	Envahisseur émergent	Contrôle chimique	Chinnock, 2015
Genus: <i>Tephrocactus</i>					
<i>T. articulatus</i> (Pf) Bkgb Argentine	Afrique du Sud Namibie	Ornementale de jardin populaire	Envahisseur émergent	Contrôle chimique	Walters <i>et al.</i> , 2011





Figure 1
Invasion d'*Opuntia engelmannii* en Afrique du Sud : origine USA

cultivés ou ont été naturalisés à Madagascar, mais ne sont pas encore reconnus comme invasifs (Kull *et al.*, 2012). En 2010, une courte étude des cactus invasifs en Namibie a révélé 25 espèces sérieusement envahissantes, mais aucune incitation à leur gestion ou pour éviter de nouvelles invasions n'était donnée (Zimmermann, 2010). Seules deux espèces de cactus introduites ont été signalées en

Angola (Figueiredo et Smith, 2008). En général, les listes des cactus envahissants sont sérieusement sous-estimées à cause du peu de spécimens d'herbiers et d'enquêtes inadéquates. Il est difficile de préparer de bons spécimens d'herbiers de plantes succulentes; de plus, beaucoup d'échantillons, incluant des spécimens types, sont perdus à cause de la pourriture ou de la mauvaise préparation (Anderson, 2001 ; Chinnock, 2015).

Actuellement, les cactus envahissants agressifs sont communs dans les rocailles privées et publiques aussi loin qu'en Grèce, Turquie et Croatie. Un accès facile à des cactus adventices en pépinières (**Figure 1**) et sur Internet (Humair *et al.*, 2015) va inévitablement augmenter l'installation et l'invasion qui s'en suit, de telles adventices. Heureusement, les cactus adventices tendent à avoir une longue période de latence avant d'être reconnus comme envahissants; cela fournit des opportunités pour une détection précoce et des initiatives de réponse rapide. Une augmentation exponentielle des invasions de cactus peut être attendue.

TABLEAU 3 Principaux Cactoideae et Pereskioideae étrangers invasifs : origine, pays d'invasion, utilisation, statut et gestion

Genre, espèce et origine	Pays où elle a été introduite et où elle est invasive	Utilisation	Statut invasif	Gestion	Références clés
Sous-famille : Cactoideae					
Genre : <i>Acanthocereus</i>					
<i>A. tetragonus</i> (L.) Hmlk Amérique Centrale	Australie	Ornementale	Non sérieux et localisé	Aucune	Mann, 1970
Genre : <i>Cereus</i>					
<i>C. jamacaru</i> (DC) Amérique du Sud	Afrique du Sud Namibie	Ornementale	Sérieux	Biocontrôle raisonnablement efficace mais lent	Paterson <i>et al.</i> , 2011
<i>C. hildemianus</i> Schum (= <i>C. uruguayanus</i>)	Afrique du Sud	Ornementale	Non sérieux	Aucune	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>C. hexagonus</i> (L.) Mill. Nord de l'Amérique du Sud	Australie	Ornementale	Non sérieux	Aucune	Hosking <i>et al.</i> , 1988
Genre : <i>Echinopsis</i>					
<i>E. oxygona</i> (Link.) Zucc. ex Pf Nord-ouest de l'Argentine	Australie	Ornementale	Non sérieux	Aucune	Novoa <i>et al.</i> , 2014
<i>E. chamaecereus</i> FrdH & Glae	Australie	Ornementale	Non sérieux		Novoa <i>et al.</i> , 2014
<i>E. schickendantzii</i> Weber (<i>E. spachiana</i>) Nord-ouest de l'Argentine	Afrique du Sud	Ornementale	Sérieux	Limited chemical control	Walters <i>et al.</i> , 2011

(suite)

Genre, espèce et origine	Pays où elle a été introduite et où elle est invasive	Utilisation	Statut invasif	Gestion	Références clés
Genre : <i>Harrisia</i>					
<i>H. balansae</i> (K. Scum) Tayl. & Zappi Argentine	Afrique du Sud	Ornementale et haies	Non sérieux et très localisé	Programme de réponse rapide visant l'éradication	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>H. martinii</i> (Lab.) Britt. Argentine	Australie Afrique du Sud	Ornementale	Non sérieux après un bon biocontrôle	Biocontrôle avec <i>Hypogeococcus festerianus</i>	Klein, 1999
<i>H. pomanensis</i> (Web.) Britt. & Rose Chaco de l'Amérique du Sud	Australie Afrique du Sud	Ornementale	Très localisé	Programme de réponse rapide en Afrique du Sud visant l'éradication	Novoa <i>et al.</i> , 2014
Genre : <i>Hylocereus</i>					
<i>H. undatus</i> (Haw.) Britt. & Rose Amérique Centrale	Afrique du Sud	Culture commerciale pour les fruits	Pas sérieux et localisé	Aucune	Walters <i>et al.</i> , 2011
<i>H. polyrhizus</i> (Web.) Britt. & Rose	Iles du Pacifique	Ornementale	Statut inconnu	Aucune	Novoa <i>et al.</i> , 2014
<i>H. costaricensis</i> (Web.) Britt. & Rose	Iles du Pacifique	Ornementale	Adventice émergente	Aucune	Novoa <i>et al.</i> , 2014
<i>H. triangularis</i> (L.) Britt. & Rose	Espagne	Ornementale	Adventice émergente	Aucune	Novoa <i>et al.</i> , 2014
Genre : <i>Myrtillocactus</i>					
<i>M. geometrizans</i> (Pf) Cons Amérique Centrale	Afrique du Sud	Ornementale	Pas sérieux et très localisé	Aucune	Walters <i>et al.</i> , 2011
Genre : <i>Peniocereus</i>					
<i>P. serpentinus</i> (Lag. & Rodr.) Tayl Mexique	Australie Afrique du Sud	Ornementale	Non sérieux	Aucune	Walters <i>et al.</i> , 2011
Genre : <i>Selenicereus</i>					
<i>S. macdonaldiae</i> (Hk) Britt. & Rose Honduras	Australie	Ornementale	Non sérieux	Aucune	Randall, 2002
Sous-famille : Pereskioideae					
Genre : <i>Pereskia</i>					
<i>P. aculeata</i> Mill.	Afrique du Sud Australie	Haies et les fruits étaient utilisés pour les confiseries	Sérieux en Afrique du Sud Localisé en Australie	Une première tentative de biocontrôle en utilisant deux insectes Contrôle chimique	Paterson <i>et al.</i> , 2011



GESTION DES ESPÈCES INVASIVES D'OPUNTIOIDEAE

De nombreuses options existent pour **la gestion et le contrôle** des Opuntioideae invasifs :

- La prévention (contrôle pré-frontalier);
- Une détection précoce et une réponse rapide;
- Une analyse des risques;
- Un contrôle mécanique, biologique et chimique;
- L'utilisation.

Le contrôle est souvent entravé par des conflits d'intérêt: un cactus adventice peut être considéré comme bénéfique par certains, mais comme une problématique nécessitant un contrôle par d'autres. Cela peut devenir le plus gros point de blocage dans la recherche de solutions, particulièrement parmi les Opuntia et les tribus des Hylocereeae et Cereeeae.

Figure 2

Invasion d'*Opuntia stricta* en Arabie Saoudite: origine USA



¹ Pour une mise à jour plus détaillée sur le contrôle biologique des cactus envahissants, consulter Winston et al., eds (2014) ou www.ibiocontrol.org/catalog

Contrôle biologique

Les premiers rapports d'un contrôle biologique délibérément planifié et réussi sur les cactus datent de 1913 quand la cochenille, *Dactylopius ceylonicus* (Verte), a été introduite en Afrique du Sud en provenance l'Inde pour contrôler *O. monacantha* (Lounsbury, 1915 ; Zimmermann et al., 2009). Cette réussite a été répétée à la Réunion, sur l'île Maurice et en Australie et a encouragé les scientifiques australiens à s'embarquer dans l'un des plus grands et plus spectaculaires projets de bio-contrôle d'adventices de l'histoire, à savoir le bio-contrôle réussi d'*O. stricta* (Haw.) Haw. dans le Queensland et la Nouvelle-Galles du Sud dans les années 1920 et 1930 (Dodd, 1940 ; Mann, 1970 ; Zimmermann et al., 2009). Dès lors, le bio-contrôle a été déployé contre 28 autres cactus envahissants, impliquant plus de 22 installations réussies d'insectes et de mites se nourrissant de cactus (Zimmermann et al., 2009). Presque 42% de ces projets ont été complètement réussis; et 18% ont atteint un contrôle substantiel (Zimmermann et al., 2009 ; Klein, 2011 ; Hosking, 2012 ; Winston et al., eds, 2014). Plus récemment, *Cylindropuntia fulgida* var. *fulgida* (Eng.) Knuth et *C. fulgida* var. *mamillata* (Figure 2) ont été contrôlés avec succès en Afrique du Sud (Paterson et al., 2011).

Le **Tableau 4** liste les cactus envahissants les plus importants qui ont été soumis au bio-contrôle. La liste n'inclut pas les espèces qui sont devenues invasives dans leur habitat naturel, et ne prend pas en compte les agents de bio-contrôle qui, soit ne se sont pas installés soit n'ont pas eu d'impact sur leur cactus hôte¹.

TABLEAU 4 Envahisseurs de cactus exotiques invasifs : pays d'introduction et résultat de l'introduction délibérée des ennemis naturels pour le contrôle biologique

Cactus invasif	Pays où le biocontrôle a été introduit	Utilisation	Statut d'envahisseur
Sous-famille : Opuntioideae			
Genre : <i>Opuntia</i>			
<i>O. aurantiaca</i> Lindl. (Argentine, Uruguay)	Australie	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Modéré variable
	Afrique du Sud		Modéré
	Australie	<i>Zophodia tapiacola</i> (Dyar)	Modéré
	Australie Afrique du Sud	<i>Dactylopius austrinus</i> De Lotto	Considérable Considérable
<i>O. elata</i> Link & Otto ex S-D	Australie	<i>Dactylopius ceylonicus</i> (Green)	Insignifiant
<i>O. elatior</i> Mill. (Amérique Centrale)	Indonésie	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotype " <i>ficus-indica</i> "	Largement répandu
	Kenya		?
	Inde		Largement répandu

(suite)

Cactus invasif	Pays où le biocontrôle a été introduit	Utilisation	Statut d'envahisseur
<i>O. engelmannii</i> S-D ex Eng. 3 variétés (USA)	Afrique du Sud	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotype " <i>ficus-indica</i> "	Modéré à insignifiant en fonction de la variété
	Australie		Inconnu
<i>O. ficus-indica</i> (L.) Mill. (épineux) (Mexique)	Australie	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotype " <i>ficus-indica</i> "	Considérable
	Afrique du Sud		Considérable
	Hawaï		Considérable
	Australie	<i>Cactoblastis cactorum</i>	Considérable
	Afrique du Sud		Considérable
	Hawaï		Considérable
	Ile Maurice		Considérable
	Afrique du Sud	<i>Metamasius spinolae</i> (Gyllenhal)	Considérable (localisé)
Hawaï Afrique du Sud	<i>Archlagocheirus funestus</i> (Thomson)	Considérable Insignifiant	
<i>O. humifusa</i> (Raf.) Raf. (USA)	Afrique du Sud	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotype " <i>stricta</i> "	Largement répandu
		<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Insignifiant
<i>O. leucotricha</i> (DC.) (Mexique)	Afrique du Sud	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotype " <i>ficus-indica</i> "	Modéré
		<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Insignifiant
<i>O. monacantha</i> Haw. (Amérique du Sud)	Australie	<i>Dactylopius ceylonicus</i> (Green)	Largement répandu
	Inde		Largement répandu
	Kenya		Modéré
	Sri Lanka		Largement répandu
	Madagascar		Largement répandu
	Ile Maurice		Largement répandu
	Tanzanie		Modéré
	Afrique du Sud		Largement répandu
	Ile de l'Ascension		Modéré
	Ile Maurice	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Considérable
	Afrique du Sud		Insignifiant
<i>O. robusta</i> (spiny) (USA)	Australie	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotype " <i>ficus-indica</i> "	Considérable
	Afrique du Sud		Modéré
	Australie	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Considérable
	Afrique du Sud		Considérable
<i>O. salmiana</i> (Parm.) ex Pf (Argentine)	Afrique du Sud	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Insignifiant
<i>O. stricta</i> ^b (Haw.) Haw. (deux variétés) (USA, Mexique)	Australie	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotype " <i>stricta</i> "	Initialement largement répandu
	Inde		Largement répandu
	Kenya		Largement répandu
	Inde		Largement répandu
	Namibie		Modéré
	Arabie Saoudite		Probablement largement répandu
	Sri Lanka		Considérable



(suite)

Cactus invasif	Pays où le biocontrôle a été introduit	Utilisation	Statut d'envahisseur
<i>O. stricta</i> ^b (Haw.) Haw. (deux variétés) (USA, Mexique)	Australie	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Largement répandu
	Kenya		Insignifiant
	Namibie		Modéré
	Nouvelle Calédonie		Considérable
	Afrique du Sud		Modéré
<i>O. streptacantha</i> Lem. (Mexique)	Australie	<i>Moneilema blapsides</i> Newman	Insignifiant
		<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) "ficus-indica" biotype	Considérable
		<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Modéré sur les jeunes plantes
		<i>Archlagocheirus funestus</i> (Thomson)	Insignifiant
		<i>Moneilema blapsides</i> Newman	Insignifiant
<i>O. tomentosa</i> S-D. (Mexique)	Australie	<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell)	Modéré
	Afrique du Sud	biotype "ficus-indica"	Considérable
<i>O. tuna</i> ^a (L.) Mill. (Caraïbes)	Ile Maurice	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Insignifiant
		<i>Dactylopius opuntiae</i> (Cockerell) biotype "ficus-indica"	Initialement modéré
Genre : <i>Cylindropuntia</i>			
<i>C. fulgida</i> (Eng.) Knuth var. <i>fulgida</i> (Sonora, Mexique, USA)	Afrique du Sud	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotype "cholla"	Largement répandu
	Zimbabwe		Largement répandu
<i>C. fulgida</i> (Eng.) Knuth var. <i>mamillata</i> (USA)	Australie	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotype "cholla"	Bon progrès
	Namibie		Largement répandu
	Afrique du Sud		Largement répandu
	Zimbabwe		Largement répandu
<i>C. imbricata</i> (Haw.) Knuth (Mexique, USA)	Australie	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotype "imbricate"	Largement répandu
	Namibie		Considérable
	Botswana		Considérable
	Afrique du Sud	Considérable	
	Afrique du Sud	<i>Cactoblastis cactorum</i> (Berg)	Insignifiant
<i>C. leptocaulis</i> (DC) Knuth (USA)	Australie	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotype "imbricate"	Considérable
	Afrique du Sud		Largement répandu
<i>C. kleiniei</i> (DC) Knuth (Mexique, USA)	Australie	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotype "imbricate"	Considérable
<i>C. rosea</i> (DC) Bkbg (Mexique)	Australie	<i>Dactylopius tomentosus</i> (Lamarck) biotype "imbricate"	Insignifiant
Sous-famille : Cactoideae			
Genre : <i>Acanthocereus</i>			
<i>A. tetragonus</i> (L.) Hmlk (Argentine)	Australie	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Modéré
Genre : <i>Cereus</i>			
<i>C. jamacaru</i> (DC) (Argentine, Brésil)	Afrique du Sud	<i>Nealcidion cereicola</i> (Fisher)	Considérable là où il est établi
		<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considérable

(suite)

Cactus invasif	Pays où le biocontrôle a été introduit	Utilisation	Statut d'envahisseur
Genre : <i>Harrisia</i>			
<i>H. balansae</i> (KSch) Taylor & Zappi (Argentine)	Afrique du Sud	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considérable
<i>H. martinii</i> (Lab.) Britt. (Argentine)	Australie	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considérable
	Afrique du Sud	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considérable
	Afrique du Sud	<i>Nealcidion cereicola</i> (Fisher)	Insignifiant à modéré
<i>H. pomanensis</i> (Web) Britt. & Rose (Argentine)	Afrique du Sud	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considérable
<i>H. regelii</i> (Wngt) Borg (Argentine)	Australie	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considérable
<i>H. tortuosa</i> (Otto & Dietr.) Britt. & Rose	Australie	<i>Hypogeococcus festerianus</i> (Lizer & Trellis)	Considérable
Sous-famille : Pereskioideae			
Genre : <i>Pereskia</i>			
<i>P. aculeata</i> Mill. (Argentine, Brésil)	Afrique du Sud	<i>Phenrica guerini</i> Bechyne	Insignifiant

^a *O. tuna* n'est plus reconnu comme une espèce (Hunt *et al.*, 2006).

^b *O. dillenii* est maintenant considéré comme une forme épineuse d'*O. stricta* et il est parfois cité comme une sous-espèce.

Généralement, le contrôle biologique des cactus adventices a été plus facile que pour certains taxons dans d'autres familles de plante. Cela est dû à l'absence d'espèces autochtones de cactacées en dehors des Amériques, à l'exception de *Rhipsalis baccifera* (Mill.) Stearn, qui est probablement arrivée en Afrique du Sud, à Madagascar et au Sri Lanka avec les oiseaux migrateurs (Rebman et Pinkava, 2001). Cet ensemble de circonstances a permis l'utilisation sûre d'insectes et de mites phytophages qui sont moins spécifiques pour l'hôte. Cependant, puisque le figuier de Barbarie (*O. ficus-indica*) est en train de devenir de plus en plus important à l'échelle mondiale, le choix des agents de bio-contrôle pour les nouveaux cactus adventices est de plus en plus restreint, particulièrement dans le cas des *Opuntia*, puisqu'on ne peut pas se permettre de compromettre la sécurité de cette nouvelle culture mondiale. Il est de plus en plus difficile de trouver des ennemis naturels en dehors des Dactylopiidae qui sont suffisamment spécifiques à l'hôte pour être considérés pour le bio-contrôle des *Opuntia* envahissants.

Plus récemment, le contrôle biologique réussi des cactus envahissants peut être attribué à de nouveaux effets d'association (Hokkanen et Pimentel, 1989). Cela s'applique premièrement à la cochenille et entraîne l'utilisation d'agents de bio-contrôle qui n'ont pas d'histoire récente d'interaction intensive dans le temps d'évolution avec leur hôte. L'objectif est de profiter du manque de commensalisme évolué, commun à beaucoup de sys-

tèmes prédateur-proie. Récemment, deux biotypes de cochenille (=génotypes) ont été identifiés et évalués : *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (biotype "*stricta*") et *D. tomentosa* (Lamarck) (biotype "*cholla*") (Githure *et al.*, 1999 ; Volchansky *et al.*, 1999 ; Mathenge *et al.*, 2009 ; Jones *et al.*, 2014). Ils fournissent un excellent contrôle d'*O. stricta* var. *stricta*, *O. humifusa* et *C. fulgida* var. *fulgida* et *C. fulgida* var. *mamillata* resp., non seulement en Afrique du Sud mais aussi en Australie, au Kenya et en Arabie Saoudite (Paterson *et al.*, 2011). Les nouvelles recherches se concentrent sur l'identification de nouveaux biotypes de cochenilles pour *O. engelmannii*, *O. elata* S-D, *C. pallida* (Rose) Knuth et *C. spinosior* (Eng.) Knuth. L'existence de biotypes adaptés à l'hôte au sein des espèces de cochenilles farineuses *Hypogeococcus festerianus* Granara de Willink, pour contrôler les envahisseurs des genres *Harrisia* et *Cereus*, ne devrait pas être exclue. Les perspectives de contrôle biologique des nouveaux envahisseurs provenant des Cactoideae sont généralement bonnes.

Les risques du contrôle biologique sont minimaux. Il n'y a pas de cas connus d'effets non-ciblés imprévus des agents de contrôle biologique des cactus. Les arthropodes cactophages sont connus pour être spécifiques aux espèces de Cactaceae hôtes; puisque la famille est endémique des Amériques, il est très improbable qu'un changement d'hôte non prévu vers une autre plante se produise en dehors de son habitat naturel. La mouche du cactus, *Cactoblastis cactorum* (Berg), et



la cochenille, *D. opuntiae*, étaient connues pour avoir beaucoup d'hôtes dans le genre *Opuntia*; on a prédit que les deux insectes s'établiraient sur les figuiers de Barbarie sans épines cultivés et les *Opuntiae* invasifs. L'utilisation de ces deux insectes pour le contrôle biologique a été basée sur des risques calculés, étant donné la sévérité des invasions de cactus à ce moment-là. De plus, l'introduction délibérée de la mouche du cactus dans quelques îles des Caraïbes en 1957 a été très regrettable et mal conçue (Zimmermann *et al.*, 2001). Elle a été introduite pour contrôler *O. triacantha* (Willd.) Sw indigène et on savait que la mouche se développerait aussi sur la plupart des espèces du genre *Opuntia* dans les Indes de l'Ouest. Avec le temps, la mouche s'est propagée au continent américain à travers le commerce de plants (Pemberton, 1995), via des événements météorologiques ou par de multiples introductions directement depuis l'Amérique du Sud (Marsico *et al.*, 2011). Maintenant elle menace des espèces natives d'*Opuntia* aux Etats-Unis d'Amérique et au Mexique.

La cochenille, *D. opuntiae*, largement utilisée comme agent de contrôle biologique en dehors de son habitat naturel (Etats-Unis d'Amérique et Mexique), peut avoir été transportée comme contaminant sur du matériel végétatif de plantes vers plusieurs pays, incluant la région Méditerranéenne. Elle a aussi été introduite par inadvertance, confondue avec la cochenille à carmin, *D. coccus*. De plus, puisqu'elle est dispersée par le vent, il y a aussi une infime chance qu'elle ait atteint les plantations de figuiers de Barbarie par les courants d'air, spécialement les plantations proches de populations d'*Opuntia* invasifs infestées par l'insecte. Cela peut seulement se produire là où *D. opuntiae* est utilisée pour le bio-contrôle, par exemple, en Afrique du Sud, en Inde, au Sri Lanka, au Kenya, en Indonésie, en Australie, à Hawaï et sur l'île Maurice. Il est vital de s'assurer que seul du matériel végétal indemne de contaminants est utilisé pour les nouvelles plantations de figuier de Barbarie.

Contrôle chimique et mécanique

Le contrôle mécanique est rarement une option viable pour gérer les invasions de cactus, parce que la reproduction végétative est possible à partir des petits fragments qui restent après un nettoyage physique. Le contrôle chimique est recommandé là où de petites et nouvelles invasions doivent être confinées, contrôlées ou même éradiquées, mais c'est rarement viable quand de grandes populations étendues doivent être contrôlées. Plusieurs campagnes d'applications chimiques dans l'histoire du contrôle des cactus ont échoué à cause des coûts impliqués et du rétablissement rapide des populations: le contrôle chimique ne s'achève jamais (Dodd, 1940 ; Annecke et Moran, 1978 ; Moran et Annecke, 1979).

L'épaisse couche protectrice de cire et la voie d'assimilation photosynthétique du métabolisme acide crassulacéen (CAM) (stomates fermés pendant la journée) dans la plupart des cactus restreint sévèrement l'assimilation des herbicides foliaires appliqués, à moins qu'un additif mouillant soit utilisé. Cependant, la plupart des cactus envahissants se prêtent aux traitements par injection dans la tige avec des herbicides systémiques à cause de leur nature succulente. Les avantages sont la translocation rapide à toutes les parties de la plante, des dégâts minimaux aux espèces non-cibles et un faible coût. L'accès aux tiges chez certains cactus épineux formant des fourrés est un problème potentiel pour l'utilisation de la méthode de l'injection dans la tige (Grobler, 2005).

Prévention

Des recherches sont en cours pour prévenir l'introduction et l'installation de nouveaux cactus envahissants. Les initiatives incluent des contrôles strictes avant et après les frontières, l'évaluation des risques avant que les espèces ne soient introduites, et l'identification et la régulation des voies potentielles d'introduction (Novoa *et al.*, 2015). La législation peut jouer un rôle important pour éviter l'installation de nouveaux envahisseurs ou pour contrôler les cactus invasifs. Cela peut inclure le recueil des listes d'espèces prohibées et d'espèces avec des mesures strictes de contrôle. En Afrique du Sud, 34 espèces de cactus sont listées dans plusieurs catégories de plantes invasives étrangères selon les termes du règlement de l'Autorité Nationale de la Gestion de l'Environnement (NEMA), qui rendent le contrôle obligatoire (Anon., 2014).

Une analyse des 57 cactus envahissants à l'échelle mondiale montre que les espèces de certains genres sont plus promptes à devenir envahissantes que d'autres. Dans le seul genre *Opuntia*, 26 espèces (sur un total de 181) sont déjà invasives quelque part dans le monde. De la même manière, dans le genre *Harrisia*, cinq espèces (sur un total de 20) sont actuellement envahissantes. Par conséquent, il pourrait être justifié pour un pays particulier de déclarer un genre entier comme indésirable. Cette approche est déjà appliquée en Afrique du Sud, où il est interdit d'introduire toute nouvelle espèce des genres *Cylindropuntia*, *Harrisia* et *Opuntia* (Anon., 2014), dans le même temps les espèces qui sont déjà naturalisées (à l'exception des espèces qui ont une valeur commerciale) sont sujettes à un contrôle obligatoire (Anon., 2014). En Australie, à l'exception des *O. ficus-indica* inermes, toutes les espèces des genres *Opuntia*, *Austrocylindropuntia* et *Cylindropuntia* sont déclarées « Adventices d'Importance Nationale » (le genre *Corynopuntia* peut être ajouté à la liste) (Chinnock, 2015). Il est très improbable que des permis soient délivrés pour l'introduction d'une espèce de ces genres. D'autres pays peuvent avoir à envisager des législations similaires.



Il y a plus de 800 espèces sur le marché des cactus d'ornement, dont 25 envahisseurs connus (Novoa *et al.*, 2016). Au moins 266 de ces espèces sont introduites dans d'autres pays principalement sous forme de graines. Le contrôle d'un tel nombre d'espèces introduites pour identifier des espèces potentiellement invasives est un défi, spécialement quand elles sont importées sous forme de graines (Humair *et al.*, 2015), et la Nouvelle-Zélande est le seul pays qui contrôle tous les colis pour les graines. Cependant, une règle générale est que les espèces avec de grosses graines lourdes sont plus promptes à être invasives que les espèces à petites graines (Novoa *et al.*, 2016) (les exceptions sont les genres *Echinopsis*, *Cereus* et *Harrisia*). La meilleure option pour interdire l'introduction d'espèces nuisibles pourrait être une évaluation des risques au niveau du genre, menée en consultant les importateurs et le marché de cactus horticole. Une recommandation existante suggère que tous les genres contenant des espèces envahissantes devraient être interdits. Pour le moment, l'Afrique du Sud a seulement interdit l'importation des espèces des genres *Opuntia*, *Cylindropuntia* et *Harrisia* qui ne sont pas déjà dans le pays (Anon., 2014). La plupart des espèces de cactus du marché ornemental appartiennent à des genres sans espèce envahissante signalée. A ce jour, aucune espèce envahissante n'a été signalée pour le grand genre *Mamillaria*; ce groupe très populaire de plantes ornementales pourrait donc être exclu des réglementations.

D'autres caractéristiques qui peuvent être utiles dans l'évaluation du risque sont la stratégie de reproduction et les vecteurs de dispersion.

UTILISATION ET CONFLITS D'INTÉRÊT

Une culture de l'utilisation des espèces de cactus (principalement *Opuntia*) s'est développée au cours de milliers d'années, principalement au Mexique et dans quelques pays d'Amérique du Sud et Centrale. Au cours des 400 dernières années, quand une plante était introduite dans un autre pays, les savoirs liés à son utilisation n'ont pas toujours été transférés avec elle. Dans les pays où la forme épineuse du figuier de Barbarie (*O. ficus-indica* épineux) est devenue invasive, il y a eu un changement clair de « utile » pendant son installation à « gênant » dans sa phase d'expansion subséquente jusqu'à ce qu'elle soit finalement perçue comme un désastre national. Cependant, plus récemment, il y a eu une renaissance significative des utilisations multiples du figuier de Barbarie (*O. ficus-indica* inerme), et celles-ci peuvent aussi être appliquées au figuier de Barbarie avec épines. Il y a une large gamme d'articles sur ses usages, incluant beaucoup de recettes et sous produits de la « tuna » (le fruit) et des *nopalitos* (cladodes tendres utilisés comme légume vert) et ses

applications médicales (De Waal *et al.*, 2015 ; Sáenz *et al.*, eds, 2006). L'utilisation des parties végétatives d'*O. ficus-indica*, *O. robusta* et plus récemment *N. cochenillifera* comme source de fourrage est de plus en plus pratiquée; dans certains pays, comme le Brésil, elle s'est développée en une industrie conséquente (Mondragón Jacobo et Pérez González, 2001 ; Dubeux *et al.*, 2015a). *Opuntia ficus-indica* est aussi l'hôte principal pour la production de la cochenille carmin, *D. coccus* (Costa), qui est une industrie majeure au Pérou (Flores Flores et Tekelenburg, 1995). Il y a eu des efforts considérables pour appliquer ces nombreux usages aux populations envahissantes de figuier de Barbarie épineux, dans une tentative de renverser son statut d'envahisseur et le transformer en un atout. Cependant l'utilisation seule n'est pas suffisante pour entraver la densification et la diffusion du figuier de Barbarie épineux en Erythrée, au Yémen et en Ethiopie, où plusieurs milliers d'hectares sont envahis et en expansion.

Il y a beaucoup à apprendre des pays, tels que le Mexique, où les cactus des trois sous-familles ont été largement utilisés, pendant des milliers d'années, par les anciennes civilisations, (Hoffmann, 1995 ; Anderson, 2001). Au Mexique, les envahisseurs agressifs bien connus comme *Cyl. Imbricata* (Haw) Knuth et *O. engelmannii*, sont largement utilisés pour le fourrage (Benson, 1982 ; Nobel, 1994).

Il y a eu plusieurs années de débat et de négociations avant qu'il soit décidé de s'embarquer dans un programme de contrôle biologique contre le figuier de Barbarie épineux (*O. ficus-indica*) pour arrêter la progression de l'invasion en Afrique du Sud (Annecke et Moran, 1978). Deux ennemis naturels, la mouche du cactus (*C. cactorum*) et la cochenille (*D. opuntiae*), ont été lâchés en 1933 et 1938, respectivement. Suivant le succès du bio-contrôle (Petty, 1948), un effort a été fait pour utiliser les petits restes de l'infestation pour réduire davantage son statut d'envahisseur (Brutsch et Zimmermann, 1993, 1995). Aujourd'hui ces restes d'infestation sont bien utilisés, principalement comme source de fruits; le contrôle n'est plus nécessaire, sauf dans des situations particulières, telles que dans les zones de conservation (Beinart, 2003). En revanche, l'Ethiopie (dans la province du Tigré) et l'Erythrée n'ont pas mis en place de contrôle biologique et ne vont probablement pas le faire dans le futur; par conséquent, des infestations denses sur plus de 300 000 hectares persistent en Ethiopie (Behailu et Tegegne, 1997 ; Haile *et al.*, 2002). Les fermiers locaux sont devenus très dépendants du figuier de Barbarie épineux puisque peu de végétation naturelle subsiste. Ils sont réticents à détruire même une partie du peuplement par le contrôle biologique, parce qu'ils craignent de perdre la ressource de laquelle ils sont devenus dépendants. Malgré un effort de la FAO pour promouvoir les nouvelles utilisations des fruits et



du fourrage, il n'y a pas de preuves de la réduction de l'infestation (Portillo, communication personnelle). Dans d'autres pays ayant de grandes invasions, tels que l'Arabie Saoudite et le Yémen, des programmes d'utilisation active doivent encore commencer et les populations de figuier de Barbarie épineux continuent d'augmenter.

Madagascar est un cas spécial: ce n'est pas le figuier de Barbarie épineux (*O. ficus-indica*), mais *O. monacantha* (Raketa), qui a envahi de grandes zones du sud de Madagascar. Le cactus était intensivement utilisé - principalement comme source de fourrage et de fruits - jusqu'à ce que la population locale en devienne totalement dépendante (Middleton, 1999 ; Kaufmann, 2001). Néanmoins, quelques habitants ont vu le cactus comme un problème (Kaufmann, 2001). Des invasions similaires à grande échelle se sont produites en Inde, Australie, sur l'île Maurice, au Sri Lanka et en Afrique du Sud, mais l'adventice n'a pas été valorisée, à l'exception d'une brève période en Inde quand elle a été utilisée pour élever ce qu'ils pensaient être la cochenille à carmin, *D. coccus* (Zimmermann *et al.*, 2009 ; Winston *et al.*, eds, 2014). L'introduction de la cochenille, *D. ceylonicus*, à Madagascar en 1924 (apparemment identifiée par erreur comme *D. coccus*, avec l'intention de commencer une industrie de la cochenille) a engendré la destruction de pratiquement toutes les populations de cactus en 4 ans (Middleton, 1999). Cela a engendré une famine sévère parmi les populations locales. Selon Middleton (1999), la réhabilitation des pâturages suite à la disparition du cactus a été trop lente pour pouvoir supporter le même niveau de pastoralisme, entraînant la mort de milliers de bêtes. Le conflit d'intérêt entre les éleveurs, les communautés locales, les autorités et les hommes politiques est bien documenté par Middleton (1999) et Kaufmann (2001, 2004). Il semble que le peuple Malgache ait appris à vivre avec cette espèce transformatrice, impliquant l'utilisation intense de cette nouvelle ressource étrangère (Kull *et al.*, 2012, 2014), en partie parce qu'ils n'avaient pas d'autres choix. L'invasion d'*O. ficus-indica* dans le Tigré (Ethiopie) présente des parallèles.

D'autre part, en Afrique du Sud le conflit a fait rage pendant des années pour savoir s'il fallait commencer un programme de contrôle biologique contre *O. ficus-indica* (Beinart, 2003). Un projet a finalement été lancé en 1932 et le contrôle biologique a réduit l'infestation d'environ 80%, laissant suffisamment de plantes largement utilisées par les populations rurales (Annecke et Moran, 1978). Les éleveurs n'ont jamais été dépendants des figuiers de Barbarie épineux comme à Madagascar, et les insuffisances résultantes ont en par-

tie été compensées par les figuiers de Barbarie inermes cultivés et l'inermes *O. robusta* - un projet initié par le gouvernement sud-africain pour compenser la perte de cactus pour le fourrage et les fruits (Beinart, 2003). La résistance au contrôle biologique des invasions de figuier de Barbarie épineux dans certains pays est compréhensible; cette résistance est exacerbée quand la dépendance de la population à la plante augmente, comme en Ethiopie, en Erythrée et au Yémen.

Plus récemment, de sévères invasions d'*O. stricta*, *O. dillenii* (Ker-Gawler) Haw. (= *O. stricta* var. *dillenii*), *O. elatior* Mill. et *O. engelmannii* sont en train d'émerger à un taux alarmant à Madagascar, en Ethiopie, au Yémen, en Somalie, en Angola, en Namibie et au Kenya. Du fait que les agents de biocontrôle les plus efficaces ne sont pas spécifiques à une espèce, et à cause des conflits d'intérêt (passés et présents) dans certains de ces pays, il y a peu de chances qu'il y ait une mise en place d'un contrôle biologique pour ces espèces. L'analyse risques-bénéfices va finalement montrer que le contrôle biologique peut être considéré comme une partie du plan de gestion, même s'il peut entraîner de légers dégâts sur les espèces cultivées. La plupart des invasions de cactus sont déjà au-delà du stade où un contrôle chimique peut être mis en place. Avec le temps, l'option du contrôle biologique va devenir plus convaincante, jusqu'à ce qu'il soit finalement intégré dans un programme de gestion plus largement intégré.

Le biotype « *ficus* » de la cochenille, *D. opuntiae*, est devenu un insecte nuisible sur les figuiers de Barbarie cultivés, non seulement là où le bio-contrôle a été délibérément mis en place, mais aussi dans d'autres pays, tels que le Brésil, le Maroc, l'Espagne, l'Egypte et le Liban, où les cochenilles ont été accidentellement introduites. Un autre niveau de conflit d'intérêts peut se développer quand certains pays envisagent l'introduction de prédateurs de la cochenille depuis le Mexique pour le contrôle biologique des cochenilles dans les plantations de figuier de Barbarie. Ces prédateurs ne sont pas spécifiques à l'hôte et peuvent contrôler tous les biotypes et espèces de *Dactylopius*, incluant ceux qui sont vitaux pour le contrôle de plusieurs cactus invasifs. Cela peut sévèrement réduire l'efficacité du contrôle biologique. Pour cette raison, l'Afrique du Sud a un moratoire sur l'importation et la libération de tout prédateur qui pourrait négativement impacter les ennemis naturels de la cochenille. Malheureusement, toute libération de prédateurs en Afrique du Nord pourrait éventuellement migrer vers le sud vers des pays qui dépendent de la cochenille pour le contrôle biologique des cactus invasifs.



CONCLUSIONS

Le figuier de Barbarie est une culture de zone aride à multi-usages destinée à devenir plus importante avec l'augmentation du réchauffement climatique et de la désertification. Elle offre un grand potentiel pour les pays en développement dans les régions arides. Cependant, au même temps, ces pays font face à l'emballement du problème des cactus envahissants. L'utilisation innovante de ces cactus, principalement le genre *Opuntia*, peut être un moyen de réduction partielle de la menace. Une option plus réalisable est d'éviter, en premier lieu, l'introduction et l'installation de nouveaux envahisseurs. La recherche est nécessaire pour trouver des méthodes innovantes et intégrées pour gérer ces invasions. Il est recommandé que la recherche se concentre sur l'utilisation de la grande biomasse de plusieurs espèces envahissantes. Dans certains cas, il peut être possible de trouver de nouveaux agents de bio-contrôle spécifiques à l'espèce, incluant de nouveaux biotypes de cochenille, qui pourraient résoudre quelques problèmes (Zimmermann *et al.*, 2009). Les experts des plantes envahissantes étrangères en Afrique du Sud et autres pays ont entrepris de précieuses recherches pour prédire les nouveaux envahisseurs, particulièrement provenant du marché des pépinières de plantes succulentes. Le conflit d'intérêt a jusqu'à présent été confiné aux *Opuntia*, mais de nouvelles cultures émergentes dans les genres *Cereus* et *Hylocereus* (Nerd *et al.*, 2002), qui contiennent tous deux des espèces envahissantes, pourraient

causer l'apparition de nouveaux conflits. Les ennemis naturels (par exemple *H. festerianus*) qui ont été lâchés pour le contrôle des espèces invasives d'*Harrisia* et de *Cereus* en Australie et en Afrique du Sud sont connus pour avoir le potentiel de causer des dégâts à plusieurs espèces dans les tribus des Cereeae et des Trichocereae (McFadyen, 1979 ; McFadyen et Tomley, 1981).

Par rapport à il y a 20 ans, il y a beaucoup de nouveaux envahisseurs dans la sous-famille des Cactoideae, issus principalement du commerce des plants. Cette tendance va probablement continuer. Beaucoup de nouveaux cactus envahissants restent dans l'attente, prêts à passer à la phase d'invasion exponentielle. A Madagascar uniquement, des 52 espèces de cactus qui sont cultivés ou ont été naturalisés, seules deux sont actuellement considérées comme invasives (Kull *et al.*, 2012, 2014). Des 50 espèces restantes, 24 ont été signalées invasives dans d'autres pays (Tableau 2 et 3), comprenant quelques-uns des pires cactus-adventices connus: *O. aurantiaca*, *O. stricta*, *O. dillenii*, *C. leptocaulis*, *C. tunicata* et *Harrisia* spp.

A l'exception des insectes ennemis associés au genre *Harrisia* (McFadyen, 1979) en Amérique du Sud, les insectes cactophages associés à la sous-famille des Cactoideae n'ont pas encore été bien étudiés, contrairement à ceux associés au genre d'Opuntioideae (Mann, 1969). Il y a de bonnes perspectives pour trouver des ennemis naturels efficaces et spécifiques à l'hôte, si le contrôle biologique devenait nécessaire.



Figure 3
Invasions d'*Opuntia ficus-indica* en Afrique du Sud: Origine Mexique



Figure 4
Invasions d'*Opuntia robusta* en Australie: Origine Mexique



Figure 5
Invasion d'*Opuntia humifusa* avant le contrôle biologique en Afrique du Sud: Origine USA.



Figure 6
Invasion d'*Opuntia humifusa* après le contrôle biologique en Afrique du Sud. Helmuth Zimmermann

Figure 7

Invasions d'*Opuntia stricta* en Ethiopie

**Figure 8**

Invasions d'*Opuntia aurantiaca* en Afrique du Sud et en Australie: origine Argentine

**Figure 9**

Excellent contrôle biologique d'*Opuntia stricta* en Afrique du Sud, au Kenya, en Arabie Saoudite et en Australie en utilisant une cochenille spécifique à l'hôte, *Dactylopius apuntiae* biotype 'stricta'

**Figure 10**

Invasions d'*Opuntia stricta* dans le parc national de Tsavo au Kenya, avant le contrôle biologique (2012) (photo A. Witt)

**Figure 11**

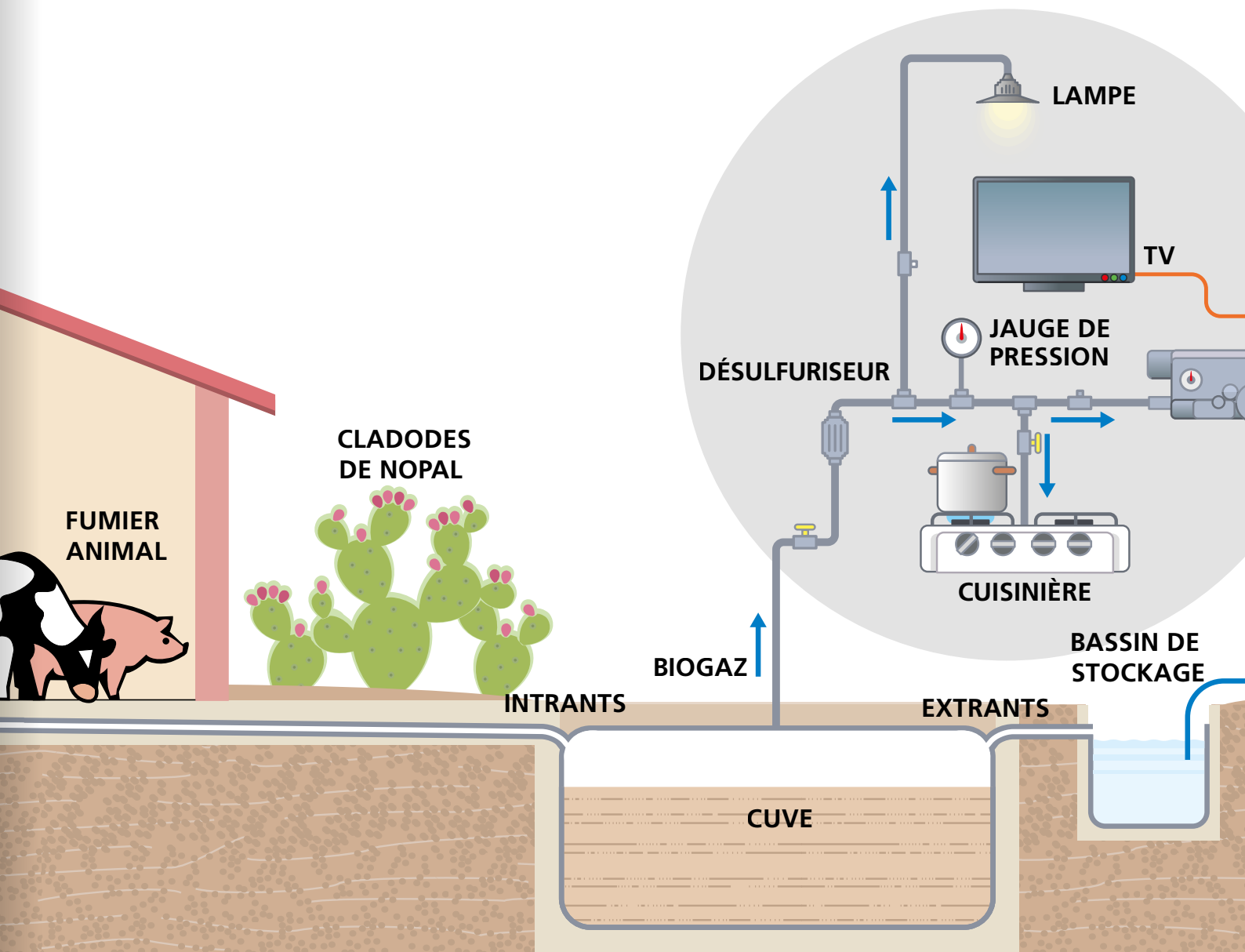
Le même lieu après un contrôle biologique réussi en utilisant un biotype spécifique à l'hôte de *Dactylopius opuntiae* (2015) (Photo A. Witt)



Production de biogaz

Maria Teresa Varnero et Ian Homer

Département d'Ingénierie et Sols, Faculté des Sciences Agricoles, Université du Chili



INTRODUCTION

L'énergie renouvelable non-conventionnelle (ERNC) est de plus en plus importante, donnant une source inépuisable d'énergie compatible entre l'homme et la durabilité environnementale. Les différentes formes de l'ERNC incluent l'éolien, le solaire, l'hydro-électrique de petite taille, la force marémotrice, la géothermie et la biomasse. La biomasse utilise les processus biologiques, chimiques et physiques pour générer des biocarburants liquides ou gazeux, tels que le biodiesel, le bioéthanol et le biogaz.

Le biogaz est une forme viable et essentielle d'énergie en agriculture et dans les zones rurales, obtenu par la transformation des déchets organiques via la fermentation anaérobie. En plus du biogaz (comprenant principalement du méthane et du dioxyde de carbone, plus d'autres gaz traces) le processus produit aussi un déchet organique stabilisé, le digestat (aussi connu comme biofertilisant), qui peut être utilisé comme amendement de sol et biofertilisant (Varnero, 1991, 2001).

Le taux de biodégradation des résidus organiques est lié à l'activité microbienne dans le système anaérobie. Cette activité dépend du type de matière première, du pH du milieu, du niveau total de solides, de la température du processus et

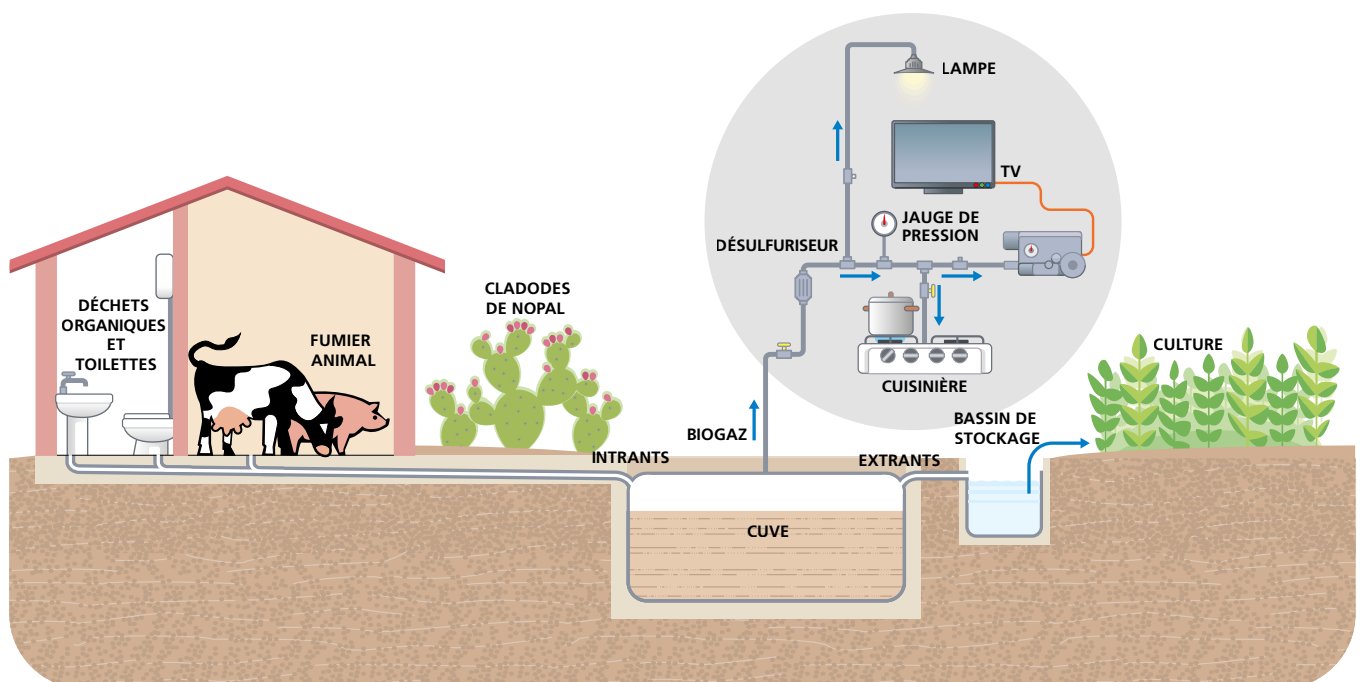
d'autres paramètres qui déterminent la durée de la fermentation pour la production de biogaz et de biofertilisants.

UTILISATION DES DÉCHETS DE CACTUS POUR LA PRODUCTION DE BIOGAZ

Les zones de climat sec ont une disponibilité réduite en déchets organiques - un désavantage évident pour la production de biogaz. On peut surpasser cet obstacle en développant des cultures énergétiques bien adaptées aux zones arides. Dans ce contexte, les opuntias - dont *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. - caractérisés par le métabolisme acide crassulacéen (CAM), sont recommandés comme source d'énergie alternative puisqu'ils ont un potentiel élevé pour la production de biomasse (García de Cortázar et Nobel, 1992 ; García de Cortázar et Varnero, 1995). Les fermiers peuvent donc réduire leur facture d'électricité et de gaz (gaz de pétrole liquéfié, GPL) en produisant leur propre énergie, tout en améliorant la qualité et l'état du sol en apportant le digestat aux champs.

A la Faculté de Sciences Agricoles de l'Université du Chili, des expériences avec *Opuntia ficus-indica* (Uribe et al., 1992 ; Varnero et al., 1992 ; Varnero et

Figure 1
Système de biogaz de
taille familiale



López, 1996 ; Varnero et García de Cortázar, 1998) indiquent que les cladodes ne sont pas de bons matériaux méthanogènes. La qualité du matériel de départ dans les digesteurs, particulièrement quand il est à chargement discontinu (Hilbert, 2009), est vitale pour le processus. Il est par conséquent nécessaire d'inclure un matériel spécial dérivé d'un autre digesteur et enrichi avec des bactéries méthanogènes, ou d'incorporer du fumier animal. De tels ajustements avancent le début de la phase méthanogène dans le digesteur et augmentent la production de biogaz. De plus, le pH de la pulpe est très bas, et cela affecte aussi la production de biogaz; pour cette raison il est préférable de la mélanger avec d'autres matières premières, principalement des fumiers animaux.

L'efficacité de la fermentation de mélange contenant différentes proportions de cladode et de fumier animal a montré qu'il est crucial de maintenir un pH du mélange proche de 6 afin d'obtenir un biogaz avec une teneur en méthane supérieure à 60%. La composition du biogaz produit par la fermentation méthanogène est très liée au pH de la matière première bio-digérée. A un pH inférieur à 5,5, le biogaz est composé principalement de dioxyde de carbone, avec une combustibilité et une teneur en énergie réduites; à l'inverse, avec un pH neutre ou basique, le biogaz est enrichi en méthane. Il est par conséquent important d'augmenter la proportion de fumier animal dans le mélange et d'utiliser des cladodes de plus d'un an. La taille des morceaux du matériel haché n'a pas d'influence significative sur l'efficacité du processus de fermentation (Varnero et López, 1996 ; Varnero et García de Cortázar, 1998).

Pendant la digestion anaérobie du fumier animal, l'addition de cladodes de cactus améliore la fermentation méthanogène, si tant est que le pH du

mélange de ces matières premières reste dans une gamme neutre à légèrement acide. De plus, l'addition d'un pourcentage approprié de cladodes au fumier animal aide la fermentation à démarrer plus vite (Uribe *et al.*, 1992 ; Varnero *et al.*, 1992) : la teneur en énergie et en carbone des cladodes favorise le développement des bactéries acidogènes, qui génèrent le substrat requis par les bactéries méthanogènes, accélérant ainsi le processus de méthanisation et réduisant le temps nécessaire pour cette activité (Uribe *et al.*, 1992 ; Varnero *et al.*, 1992).

PLANTATIONS D'OPUNTIA SPP. POUR LA PRODUCTION DE BIOGAZ

Les opuntias peuvent pousser avec succès dans des zones avec une diversité de sols et de climats; par conséquent une plantation organisée peut être mise en place pour optimiser la production de biomasse. Son évaluation économique est toujours en attente.

Des études ont montré qu'un hectare d'*Opuntia* de plus de 5 ans d'âge peut produire jusqu'à 100 tonnes de cladodes frais par an dans des zones avec peu de précipitations (≤ 300 mm) (García de Cortázar et Nobel, 1992). Dans certaines parties semi-arides du Mexique, les cladodes sont traditionnellement collectés à partir de cactus sauvages comme source de fourrage; la taille régulière améliore le rendement et la qualité des fruits et des *nopalitos*.

La taille peut procurer 10 tonnes de matière sèche (MS) $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$, et les déchets de cette taille peuvent être utilisés pour le biogaz, le compost ou l'alimentation animale (García de Cortázar et Varnero, 1995). La taille peut aussi fournir de la matière première pour alimenter les digesteurs, combinée avec du fumier animal. Les cladodes

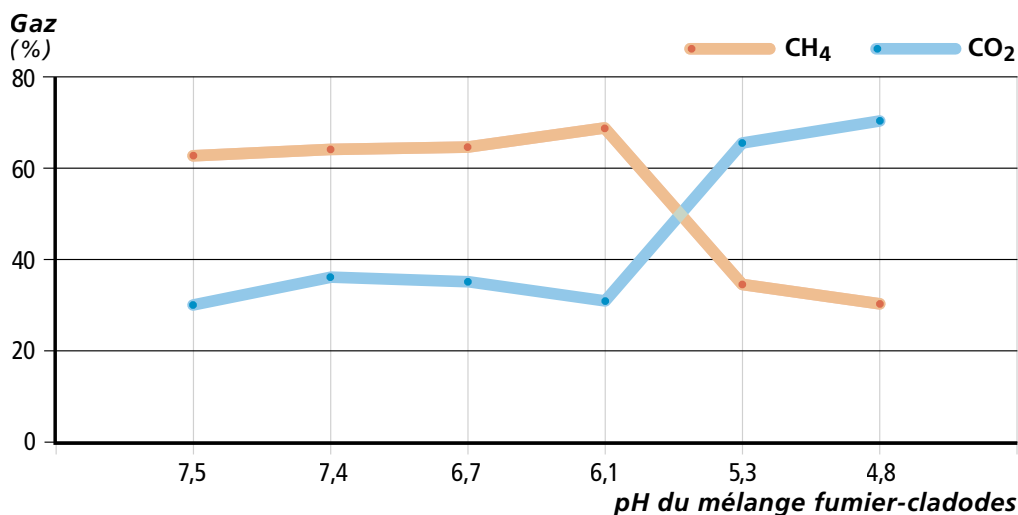


Figure 2
Composition du biogaz en fonction du pH du mélange de fumier et de cladodes (Varnero and Arellano, 1991)

matures (âgés d'un an) peuvent être coupés, hachés et directement incorporés dans le digesteur. Il est important de les utiliser dès qu'ils ont été hachés, de manière à réduire la biodégradation et améliorer l'efficacité de la production de biogaz et de biofertilisant. Si la capacité du digesteur n'est pas suffisante pour l'utilisation immédiate, les cladodes peuvent être stockés dans un endroit ombragé, frais et sec pendant plusieurs jours (Varnero et García de Cortazar, 2013).

Avec le vieillissement de la plantation, la croissance des cladodes ralentit à cause de la diminution du taux de photosynthèse nette due à l'effet d'ombrage des cladodes supérieurs (Acevedo et Doussoulin, 1984). Cependant, la teneur en matière sèche n'est pas affectée avec la poursuite de la croissance tout au long de l'année. Au Chili, avec une bonne gestion, le rendement commercial maximum de fruits frais est estimé à 16 tonnes ha⁻¹ pour des plantes de 16 à 20 ans. Elle commence à décroître entre 21 et 35 ans d'âge, atteignant 8 tonnes ha⁻¹ (Acevedo et Doussoulin, 1984 ; Pimienta Barrios, 1990). Pendant la saison de récolte, de janvier à avril, le rendement est de 5-16 tonnes ha⁻¹, alors qu'en juin-septembre, il est seulement de 0.5 tonnes ha⁻¹ (Sudzuki *et al.*, 1993).

Tohá (1999) indique que 3 kg de cladodes séchés produisent 1 m³ de biogaz, ce qui équivaut à la génération de 10kWh. De plus, Baeza (1995) indique que la valeur calorifique du biogaz de cactus est de 7 058 kcal m⁻³ (elle varie entre 6 800 et 7 200 kcal m⁻³) et le potentiel de biogaz d'*Opuntia* est équivalent à 0.360 m³ kg⁻¹ MS.

- **Scénario 1: Production faible.** Avec un rendement de 10 tonnes de MS ha⁻¹ an⁻¹, la production potentielle de biogaz est équivalente à 9.86 m³ de biogaz par jour (27.40 kg MS jour⁻¹, avec un potentiel estimé à 0.36 m³ de biogaz par kg (27.40 × 0.360 = 9.86 m³ biogaz jour⁻¹).
- **Scénario 2: Conditions intermédiaires.** La production de déchets de taille de 18 tonnes ha⁻¹ an⁻¹ génère 17.75 m³ biogaz jour⁻¹ et 49.3 kg MS jour⁻¹.
- **Scénario 3: Production optimale.** Une plantation commerciale avec de l'irrigation et de la fertilisation peut produire jusqu'à 30-40 tonnes MS ha⁻¹ (García de Cortázar et Nobel, 1992 ; Franck, 2006). La production de 30 tonnes ha⁻¹ est équivalente à 82.2 kg jour⁻¹, qui peut être utilisée comme matière première pour la production de biogaz avec un potentiel de 29 m³ jour⁻¹ (82.2 × 0.360 = 29 m³ biogaz jour⁻¹), ou 10 885 m³ ha⁻¹ an⁻¹ de biogaz - équivalent à 6.4 tonnes de pétrole (Varnero, 1991).

Il y a une différence significative dans la production de biogaz entre le meilleur et le pire scénario en conséquence des contraintes impliquées.

En se basant sur le système familial de biogaz pour les petites fermes illustré dans la **Figure 1**, les déchets

organiques peuvent être collectés en connectant les toilettes au digesteur, et/ou en accumulant les déchets de cuisine. De plus, s'il y a des animaux (par exemple une vache et deux cochons), ils fournissent aussi de la matière organique (**Tableau 2**). Cela donnerait un potentiel de biogaz de 1.05 m³, laissant à produire un complément de 2.6 m³ pour atteindre les 3.61 m³ nécessaires. De manière à déterminer la taille minimale de la plantation de cactus requise pour fournir suffisamment de matière première pour atteindre cette quantité, on devrait considérer qu'un maximum de 3 kg de cactus sont nécessaires pour produire 1 m³ de biogaz. Le digesteur doit par conséquent être alimenté avec 7.1 kg jour⁻¹ ; cela est obtenu sur une zone de 0.28 ha, en supposant une disponibilité de 10 tonnes de cladodes ha⁻¹ an⁻¹, équivalent à 27.47 kg ha⁻¹ jour⁻¹.

Sur la base de la production de biogaz décrite ci-dessus, 0.45 m³ de gaz sont obtenus par m³ de digesteur; la taille minimale du digesteur est par conséquent 8 m³. De plus, un chargement journalier de 26.24 kg doit être incorporé, combiné avec l'eau suffisante pour une concentration de solide de 7% : équivalent à 221 litres (aussi équivalent au volume du digesteur, divisé par 35 jours, c'est-à-dire le temps requis pour dégrader la matière organique). Au chargement du digesteur avec 221 litres, la même quantité de biofertilisant est produite, qui peut servir à l'irrigation, la fertilisation et à l'apport de matière organique (5.20 g N kg⁻¹, 3.90 g P kg⁻¹, 3.60 g K kg⁻¹ et 561 g Mo kg⁻¹ MS).

CONCEPTION ET UTILISATION DU BIODIGESTEUR

Le biodigesteur doit avoir certaines caractéristiques, il doit être :

- Etanche - pour éviter les sorties indésirables de gaz et l'entrée d'air non voulue.
- Thermiquement isolé - pour éviter des changements majeurs de températures.
- Equipé de valves de sécurité.
- Facilement accessible - pour le chargement et le déchargement du système avec les matières premières, le retrait des boues et l'entretien du digesteur (Varnero, 1991, 2001).

Il y a beaucoup d'informations disponibles dans divers pays, dont l'Inde, la Chine et l'Allemagne, sur la conception des biodigesteurs (García de Cortázar et Varnero, 1995). Alors que la plus grande part de la production et de l'utilisation du biogaz est obtenue à partir de biodigesteurs familiaux (**Figure 1**), les digesteurs communautaires sont aussi réalisables dans certaines situations, en particulier quand de grands volumes de matière première et l'expertise technologique sont disponibles.



Il y a deux types de digesteurs: continus et par lots (discontinus).

- **Continus.** Le chargement en matériaux est fréquent (journalier ou hebdomadaire), chaque chargement remplace approximativement 5 à 15% du volume total. La concentration de solide est faible (6 à 8% du volume), et une fois que le processus de digestion a commencé, la production de biogaz est relativement constante (celle-ci est principalement dépendante de la température). Les digesteurs continus sont mieux adaptés à des situations où il y a une production constante de matériaux pour la bio digestion, c'est-à-dire quand les cladodes sont collectés toute l'année. Ils sont aussi adaptés aux petites

propriétés où les déchets du foyer peuvent être ajoutés comme matière première - par exemple, en incorporant les fèces produites par les animaux de la ferme ou à travers la connexion entre la salle de bain et le digesteur (Varnero et García de Cortázar, 2006 ; FAO, 2011).

- Type taïwanais, fait de poches de plastique (polyéthylène (**Figure 4a**);
- Type indien (**Figure 3a**) - un gazomètre inclus dans le digesteur sous forme d'une cloche flottante;
- Type chinois (**Figure 3b**) - fermé, avec une accumulation du gaz au sommet.

- **Par lots.** Les digesteurs discontinus (**Figure 3c**)

Exemple pratique

TABLEAU 1 Consommation moyenne de biogaz énergie dans une famille de 5 personnes

	Consommation moyenne de biogaz	Consommation de biogaz de cactus
	Valeur calorifique 5 000 kcal m ³	Valeur calorifique 7 058 kcal m ⁻³ (75% of CH ₄)
Cuisine (5 heures)	0.30 m ³ h ⁻¹ × 5 h = 1.50 m ³ jour ⁻¹	0.21 m ³ h ⁻¹ × 5 h = 1.05 m ³ jour ⁻¹
3 lampes (3 heures)	0.15 m ³ h ⁻¹ × 3 h × 3 = 1.35 m ³ jour ⁻¹	0.11 m ³ h ⁻¹ × 3 h × 3 = 0.99 m ³ jour ⁻¹
Moyen de refroidissement	2.20 m ³ h ⁻¹ × 1 = 2.20 m ³ jour ⁻¹	1.57 m ³ h ⁻¹ × 1 = 1.57 m ³ jour ⁻¹
Total	5.05 m³ jour⁻¹	3.61 m³ day⁻¹

Source: Baeza, 1995.

TABLEAU 2 Résumé des calculs

	Quantité (unités)	Kg unité ⁻¹	kg	Biogaz potentiel (m ³ biogaz kg ⁻¹)	Biogaz (m ³)
Déchets de cuisine	5	0.56	2.8	0.092	0.26
Fèces humains	5	0.13	0.65	0.092	0.06
Fumier de vache	1	10	10	0.04	0.40
Fumier de cochon	2	2.8	5.6	0.06	0.336
				Sous-total	1.053
Cladodes	0.28	27.47 ^a	7.7	0.3	2.60
		total	26.64		3.62

^a 10 tonnes ha⁻¹ an⁻¹ (364 jours).

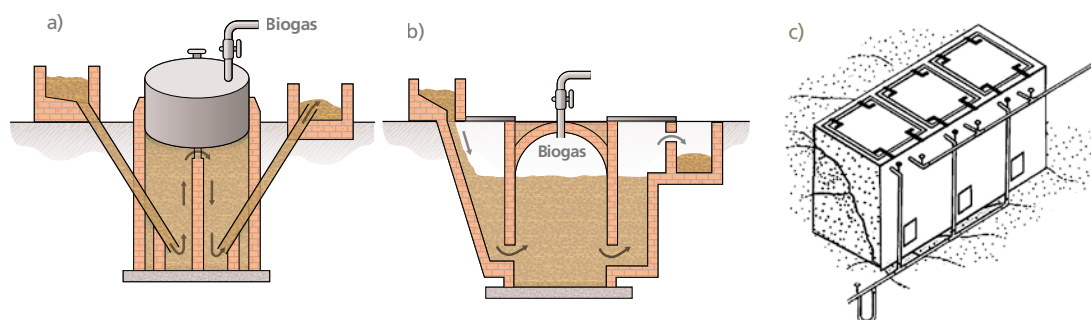


Figure 3
 a) Digesteur indien ;
 b) digesteur chinois ;
 c) digesteur par lots

comprennent une série de cuves scellées ou dépôts, avec une sortie de gaz connectée avec un gazomètre flottant, où le gaz est stocké. Avec de multiples digesteurs, un est toujours en chargement ou déchargement alors que les autres sont en production de biogaz. Alimenter ou charger le digesteur avec la matière première, qui a une concentration plus élevée de solides (40 à 60%), est réalisé en une seule fois, puisqu'il n'y a pas rechargement pendant le processus de fermentation. Le matériel organique stabilisé est déchargé une fois que la production de biogaz est finie. La production de biogaz présente une période initiale d'attente pendant laquelle l'hydrolyse de fermentation, la formation d'acides organiques et la production de méthane ont lieu. La plus grande part de la production de biogaz se produit ensuite, avant de ralentir et finalement diminuer jusqu'à presque zéro, en même temps que le matériel du lot s'épuise. La durée totale du processus dépend de la température. Le système discontinu est adapté à certaines situations, par exemple quand les matières premières présentent des problèmes de manipulation dans les systèmes continus; les matériaux sont difficiles à digérer par fermentation méthanogène; ou les matières premières sont irrégulièrement disponibles. La matière première issue de la récolte des cladodes est disponible une à deux fois par an (Varnero and García de Cortázar, 2006; FAO, 2011).

Dans les conditions optimales et pour le même volume de matière sèche, les deux types de digesteurs produisent la même quantité de biogaz. Par conséquent, le choix devrait être basé sur la fréquence de production des déchets (dans ce cas, les cladodes) et la disponibilité en eau.

Pour des producteurs de petite et moyenne taille, une large gamme de matériaux peut être utilisée pour construire les digesteurs à biogaz. Les types continus les plus économiques sont fait à partir de tubes de polyéthylènes à faible coût (ou EPDM, PVC, HDPE) comme montré dans la **Figure 4a**. Connu sous le nom de type taïwanais, il est très commun en Asie et dans quelques pays d'Amérique Latine. Le coût des matériaux pour ce type est de 7 \$ US m⁻³. Les modèles indien ou chinois peuvent être construits avec différents matériaux (**Figures 4b-f**).

ASPECTS ECONOMIQUES

Le coût initial de production de biogaz dans les foyers ruraux est d'environ de 50 \$ US par biodigesteur (Bui Xuan An *et al.*, 1999). Cet investissement est rentabilisé en 9 à 18 mois grâce aux économies de gaz. Dans les zones rurales où le principal combustible est le bois, l'utilisation de biogaz réduit la dégradation de l'écosystème (moins de déforestation et de pollutions) et mène à des économies de temps jusqu'à 5 heures par

Figure 4
Différents matériaux utilisés pour la construction de biodigesteurs :
a) gaines en plastique ;
b) briques ; c) béton ;
d) bidon recyclé en plastique ;
e) bidon recyclé en métal ;
f) préfabriqués





Figure 5

a) Digestat solide ;
b) biofertilisant (ou
digestat liquide)

jour par foyer - temps qui peut être utilisé pour d'autres tâches plus productives (Rutamu, 1999). Pour calculer la rentabilité de l'utilisation du biogaz, on suppose qu'une livre (0.45 kg) correspond à 1 m³ de biogaz; par conséquent un calcul théorique de 3.61 m³ jour⁻¹ correspondrait à 3.61 livres (1.63 kg) de gaz journalier, avec une valeur d'approximativement 2.98 \$ US jour⁻¹, ou 1 078 \$ US an⁻¹.

Les résidus obtenus à partir des processus de digestion (**figure 5b**) ont une teneur élevée en nutriments ; par conséquent, c'est un engrais de valeur et il permet d'économiser sur les dépenses d'engrais commerciaux. Selon Varnero (1991), une tonne de biofertilisant est équivalente à 40 kg d'urée, 50 kg de nitrate de potassium et 94 kg de superphosphate triple. Les prix internationaux des engrais varient de 255 \$ US à 380 \$ US tonne⁻¹ (Indexmundi, 2015). En supposant un prix moyen de 0.32 \$ US kg⁻¹ de l'engrais, chaque tonne de biofertilisant permet d'économiser 58.8 \$ US sur le coût des engrais; cette économie vient en sus de l'importante contribution en microorganismes et en matière organique, ainsi que la possibilité d'obtenir des matériaux solides au moment de vidange de digesteur (**Figure 5a**).

AUTRES UTILISATIONS DES BIOÉNERGIES

Les cladodes de cactus ont d'autres utilisations en bioénergie, telles que la production de biodiesel ou d'éthanol. Avec une production annuelle de

40 tonnes ha⁻¹ dans une culture conduite spécialement pour la production d'énergie, ou bien avec 10 tonnes ha⁻¹ de déchets de taille provenant de plantations fruitières, l'énergie peut être obtenue en les brûlant directement. Les cladodes sont récoltés, séchés au soleil et broyés, puis utilisés en les brûlant directement ou en cogénération dans un mélange à base de charbon; la valeur calorifique est 3 850 - 4 200 kcal kg⁻¹.

La technologie pour la production d'éthanol est plus complexe que celle pour la production de biogaz; elle s'adapte donc mieux à une plus grande échelle, étant donné le coût élevé de l'investissement, et elle permet des concentrations de plus de 98% d'éthanol. Pour la fermentation, des levures spécifiques sont nécessaires pour maximiser la production d'alcool. La concentration d'éthanol pendant la fermentation est de 8-12% (García de Cortázar et Varnero, 1995), pour atteindre la concentration d'éthanol requise pour le carburant, il faut distiller.

Les estimations indiquent que le mucilage de cactus peut être utilisé pour produire de petites quantités d'éthanol: environ 20 ml kg⁻¹ de mucilage. D'autre part, on peut en produire 8.6 litres à partir de 100 kg de cladodes séchés et 24.7 litres par 100 kg de fruits secs ce qui donc n'est pas considéré comme compétitif par rapport à la production à partir de fruits fermentés. Avec une densité de 635-5 000 plantes ha⁻¹, si seuls les cladodes sont utilisés (Retamal *et al.*, 1987), on peut obtenir à partir de plantations non-irriguées et irriguées une moyenne respectivement de 300 et 3 000 litres d'éthanol.



17

Marketing, contraintes et stratégies de communication

Marcos Mora

Département d'Economie Agricole, Faculté d'Agronomie, Université du Chili



INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est d'analyser les stratégies de l'agrobusiness appliquées au figuier de Barbarie et ses produits dérivés et d'examiner les problèmes du secteur affectant leur développement. Les articles revus proviennent de différentes sources, mais sont principalement d'origine mexicaine, italienne ou chilienne. Cependant on doit prendre en compte que les informations sur les produits sont rares et, en plus, elles ne sont pas à jour, comme indiqué par Inglese *et al.* (2002a). Par conséquent, le Chili est le principal objet de ce chapitre, et l'analyse est complétée et discutée avec la littérature associée aux principaux pays producteurs, le Mexique et l'Italie.

Selon la Fondation pour l'Innovation Agraire (FIA, 2010), beaucoup de pays à travers le monde produisent des figues de Barbarie, et le Mexique est le plus grand producteur mondial (actuellement proche de 70 000 ha). Les autres importants pays producteurs de figues de Barbarie sont l'Italie, l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Chili, la Bolivie, le Pérou, la Colombie, les Etats-Unis d'Amérique, le Maroc, l'Algérie, la Lybie, la Tunisie, l'Egypte, la Jordanie, le Pakistan, Israël, la Grèce, l'Espagne et le Portugal. Cependant, dans un nombre significatif de ces pays, spécialement en Afrique, les figues de Barbarie sont considérées comme un coproduit, puisque les plantes sont principalement utilisées pour la préservation des sols dégradés. Il y a un potentiel pour le développement du figuier de Barbarie à travers une large gamme d'utilisations, incluant :

- La culture comme complément de fourrage, dont le Brésil est le principal producteur (Callejas *et al.*, 2009) ;
- La consommation en légume (cladodes) et fruits frais ;
- Les utilisations médicinales ;
- L'industrialisation pour les aliments transformés (par exemple : la farine de cladodes, les confitures et les jus) ;
- L'industrialisation non-alimentaire (par exemple : la bioénergie et les cosmétiques) ;
- La production de colorant carmin.

Le figuier de Barbarie joue aussi un rôle important dans l'agriculture de subsistance dans plusieurs zones du monde. Qu'il soit cultivé à petite échelle ou que ce soient des plantes naturelles, le figuier de Barbarie est une source cruciale d'aliments (fruits et dérivés) pour les

populations rurales pauvres, et de fourrage vert ou sec pour leur bétail. C'est le cas, non seulement en Afrique du Nord et dans la Corne de l'Afrique (Erythrée, Ethiopie), mais aussi au Mexique, au Proche Orient et dans les Amériques. Alors qu'il n'est pas possible de donner une dimension économique à ce phénomène, le Tigré du nord (Ethiopie) montre l'importance du figuier de Barbarie : les plantes sauvages de figuier de Barbarie donnent une subsistance à une population entière pendant les mois ou les années de pénurie alimentaire.

Dans la plupart des pays producteurs, le figuier de Barbarie s'est développé dans les zones arides et semi-arides (Inglese *et al.*, 1995b ; Russell et Felker, 1987b). C'est une culture marginale sur le marché des fruits, mais au Mexique elle génère de l'emploi et des revenus dans les zones où peu d'autres cultures peuvent être produites (Timpanaro *et al.*, 2015b). La culture est souvent située dans des zones de forte « ruralité », cultivée par de petits et micro-fermiers ; cela la rend attractive d'un point de vue stratégique et on devrait sérieusement la considérer dans les actions de développement des politiques publiques.

De plus, au regard des ventes et du marketing, les fruits frais sont principalement commercialisés sur le marché national du frais avec de petites incursions isolées sur les marchés d'export. L'Italie, le deuxième producteur mondial, est le principal exportateur de figues de Barbarie. Sur l'île italienne de Sicile, de nombreux festivals ont lieu au moment de la récolte (Octobre Novembre) dans les villages, incluant San Cono, Biancavilla, S. Margherita Belice et Roccapalumba (Sáenz *et al.*, eds, 2006).

CONTEXTE DE PRODUCTION ET DE MISE EN MARCHÉ

Le Mexique est le plus grand producteur, représentant 80% de la production mondiale de figue de Barbarie, estimée à environ 500 000 tonnes. L'Italie (12.2%) est le second plus gros producteur, et l'Afrique du Sud (3.7%) se place troisième. Ces trois pays représentent approximativement 96% de la production mondiale. Les rendements moyens de figue de Barbarie varient énormément: de 6.5 tonnes ha⁻¹ (García *et al.*, 2003) au Mexique à 20 tonnes ha⁻¹ en Italie et 25 tonnes ha⁻¹ aux Etats-Unis d'Amérique et en Israël. Au Chili, la figue de Barbarie est traditionnellement cultivée entre les régions d'Arica et Parinacota et du Bio-Bío; cependant, plus



récemment, elle a aussi été cultivée en l'Atacama et le Maule, principalement pour répondre à la demande de consommation domestique. Il y a une forte concentration de la culture dans la zone centrale du Chili. La surface couverte par le figuier de Barbarie au Chili a diminué pour atteindre 800 ha et selon le Bureau des Etudes et Politiques Agricoles (ODEPA, 2015a) et Franck (2010), elle se concentre dans les régions proches des grandes villes, telles que Santiago, Viña del Mar et Valparaíso (**Tableau 1**), et dans l'Atacama et le Maule. La Sicile représente plus de 96% de la récolte totale de figues de Barbarie italiennes, avec 8 300 ha produisant environ 87 000 tonnes annuellement (Timpanaro *et al.*, 2015b).

L'ajout de valeur et la création de dérivés à des fins commerciales sont minimales. Néanmoins, il y a eu quelques recherches importantes avec le développement de produits agro-industriels issus du figuier de Barbarie (Sáenz *et al.*, eds, 2006). D'autre part, une dynamique très différente est présente en Italie avec une augmentation de la culture au cours des 20 dernières années. Néanmoins, le développement est limité pour diverses raisons, incluant la disponibilité limitée, le manque de coordination tout au long de la filière de distribution et la pénurie de ressources pour stimuler la recherche, l'innovation et les techniques de culture (Timpanaro *et al.*, 2015b). Le rendement moyen d'une plantation de figuier de Barbarie au Chili est d'environ 10 tonnes ha⁻¹. Cependant, avec les pratiques modernes de culture, les rendements pourraient plus que doubler.

L'écotype de figue de Barbarie le plus populaire est une sélection locale avec une chaire jaune-verte (CEZA, 2011). Cependant, il y a d'autres génotypes colorés d'*Opuntia ficus-indica* avec des fruits violet, orange, jaune, rouge et blanc (Aquino *et al.*, 2012). Ces écotypes sont produits seulement au niveau expérimental au Chili (Sáenz et Sepúlveda, 2001b). La mise en marché des figues de Barbarie est atomisée au niveau du producteur et oligopsonique/oligopolistique au niveau de la vente de gros; cela génère une asymétrie de l'information entre les producteurs et les acheteurs et augmente le pouvoir de marché des acheteurs, entravant le développement des producteurs au Chili. Cela signifie, dans de nombreux cas, que les producteurs ne peuvent pas vendre directement ou établir des contacts d'affaire avec d'autres acheteurs. Par conséquent, les producteurs attendent que le même acheteur vienne tous les ans, amenant ses propres ouvriers pour la récolte. Il y a une décennie, la même situation existait en Italie (Inglese *et al.*, 2002a): la plus grande part de la récolte était vendue par le fermier dans le champ, avec une participation limitée du producteur dans la chaîne de valeur. De nos jours, les organisations de producteurs sont plus sophistiquées; les producteurs obtiennent un meilleur revenu et ont un plus grand impact sur le marché. Un des exemples les plus efficaces est Euroagrumi

s.c.c., un consortium opérant en Sicile et commercialisant 1 500 tonnes an⁻¹ de figues de Barbarie pour une valeur de 2.5 millions €.

La production de fruit a lieu de fin juillet à fin novembre dans l'hémisphère nord, à cela s'ajoute une petite production d'hiver en Israël en janvier-mars, principalement destinée au marché local. L'Italie concentre sa production en octobre-novembre, avec plus de 60% du marché situé en Sicile, 15-20% exporté en Europe et une très petite fraction exportée au Canada (Timpanaro *et al.*, 2015b). L'Afrique du Nord n'arrive pas à atteindre le marché Européen au début de l'été (juin-juillet), quand aucun fruit n'est disponible en Italie et les températures élevées pendant la récolte d'été affectent la gestion post-récolte et l'exportation. Le Mexique produit des fruits de juin à octobre, avec de très modestes exportations vers les Etats-Unis d'Amérique et le Canada. Dans l'hémisphère sud, l'Argentine et l'Afrique du sud produisent de janvier jusqu'à mars et seulement pour les marchés locaux. Ils adoptent rarement la pratique italienne de la *scozzolatura* (suppression de la première pousse de fruits et de cladodes) pour obtenir une seconde récolte hors-saison. D'autre part, le Chili produit deux récoltes sans aide technique, la seconde en juin-septembre. Globalement les figues de Barbarie arrivent sur le marché de manière saisonnière; cependant, avec une meilleure coordination entre les pays producteurs et une gestion post-récolte précise, les figues de Barbarie pourraient être fournies aux marchés presque toute l'année, comme c'est le cas pour le kiwi.

Au Chili, le principal marché pour les figues de Barbarie est représenté par les marchands de gros (Lo Valledor et Mopocho Fair), qui revendent par la suite aux distributeurs. Selon Mora *et al.* (2013), le marché de gros représente environ 60% des ventes de figues de Barbarie. Un autre moyen important de vente, représentant approximativement 18% du produit, sont les boutiques informelles situées au coin des rues et aux feux tricolores. Enfin, les supermarchés représentent un simple 2%. Les prix ont généralement une légère tendance à augmenter. Pendant l'année, les prix augmentent quand de plus petits volumes atteignent le marché de gros et inversement. Il y a aussi une relation directe entre le calibre et le prix. On devrait prendre en compte que, pendant l'hiver (juin-septembre dans l'hémisphère sud), une petite quantité de figues de Barbarie atteint des prix bien au-dessus de la moyenne saisonnière (**Figure 1**).

Le **Tableau 2** montre la valeur unitaire par kg de figues de Barbarie exportées par avion - environ 1.9 \$ US en 2011. Si les coûts à l'exportation (approximativement 0.6 \$ US kg⁻¹) sont soustraits (Franco de port, FOB), la valeur unitaire est autour de 1.3 \$ US kg⁻¹ (basé sur le taux d'échange de septembre 2015 de 685.6 pesos chiliens = 1 \$ US). Bien que ce soit un prix attractif, il est difficile de rassembler de grands volumes de figues



TABLEAU 1 Chili : nombre de producteurs et superficies de figuier de Barbarie

Région/Variété	Nombre	Total (ha)
Région d'Atacama		
'Chilena'	2	5.18
Total	2	5.18
Région de Coquimbo		
'Blanca'	1	14.09
'Chilena'	7	69.01
Pas d'information	2	2.57
'Til-Til'	1	3.91
Total	11	89.58
Région de Valparaíso		
'Blanca'	3	1.73
'Chilena'	58	65.75
Pas d'information	6	6.32
'Til-Til'	2	8.72
Total	69	82.52
Région Métropolitaine		
'Chilena'	22	228.11
'Nopal De Castilla'	4	29.30
Pas d'information	6	20.60
'Til-Til'	50	306.22
'Undulatta Griffiths'	1	2.84
Total		587.07
Région du L.B. O'Higgins		
'Chilena'	1	0.20
Pas d'information	1	7.00
'Til-Til'	1	18.00
Total	3	25.20
Région du Maule		
'Chilena'	1	5.00
'Til-Til'	1	5.00
Total	2	10.00
Total pays		799.55

Sources: ODEPA-CIREN, 2015a, b, c; ODEPA-CIREN, 2014, 2013.

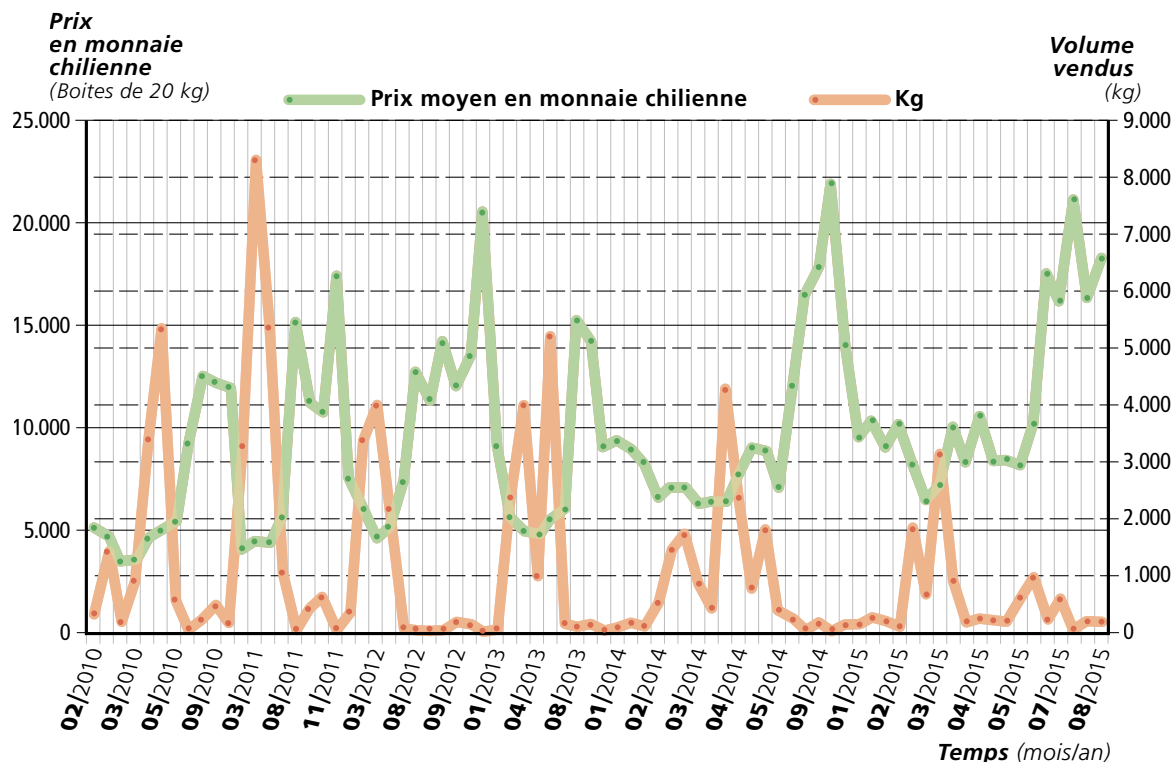


Figure 1
Prix et marché de la figue de Barbarie (haute qualité) sur plusieurs marchés de gros au Chili. Source : ODEPA (2015b).

TABLEAU 2 Exportations par avion de figes de Barbarie fraîches depuis le Chili

Année	FOB	Volume (kg)	FOB/\$US	Pays d'exportation et type de transport
2002	53 795	23 641	2.3	Canada, USA
2003	37 829	18 766	2.0	Japon, USA
2004	24 252	12 423	2.0	Arabie Saoudite, USA
2005	29 497	17 152	1.7	Canada, USA
2006	54 626	17 168	3.2	Arabie Saoudite, USA repos
2007	75 963	20 172	3.8	Espagne, USA repos
2008	42 173	12 138	3.5	Espagne, Royaume-Unis, USA repos
2009	28 779	11 201	2.6	Espagne, USA repos
2010	0	0	-	
2011	21 738	11 362	1.9	USA
2012	0	0	-	
2013	0	0	-	
2014	0	0	-	

Source: ODEPA (2015b).

de Barbarie ayant une qualité d'exportation, puisque seulement une très petite fraction atteint cette qualité. Au contraire, le marché domestique paie l'équivalent d'environ 0.6 \$ US kg⁻¹, c'est-à-dire presque la moitié du prix à l'exportation.

QUALITÉ PERÇUE DE LA FIGUE DE BARBARIE: DES ATTRIBUTS INTRINSÈQUES AUX ATTRIBUTS EXTRINSÈQUES

Selon Olson et Jacoby (1972), les critères de qualité peuvent être décrits comme : soit extrinsèques - c'est à dire liés au produit (par exemple: le prix, la couleur, l'emballage et l'étiquetage) ; soit intrinsèques - liés aux caractéristiques physiques du produit (par exemple: la composition en nutriments et le goût). Comme Grunert *et al.* (1996) l'affirment, la qualité est un phénomène multidimensionnel, décrit par un ensemble d'attributs qui sont subjectivement perçus par les consommateurs avant (attentes de la qualité) et après (expérience de la qualité) l'achat. Cependant, les attributs fondés sur la confiance influencent de plus en plus les préférences du consommateur en réponse de l'augmentation des préoccupations sur la sûreté, la santé, la commodité, la localité, l'origine, les facteurs éthiques et environnementaux (Migliore *et al.*, 2012, 2015a; Bernués *et al.*, 2003).

Le marketing des figues de Barbarie au Chili et dans les principaux pays producteurs s'est concentré sur les fruits frais, mettant essentiellement en valeur ses caractéristiques intrinsèques. Le Chili a vu le développement commercial des emballages, étiquettes, marques ou dénominations d'origine, mais aucun n'a réussi en tant qu'agent commercial formel. En Italie, deux appellations d'origine contrôlée (AOC) sont actives :

- « Ficodindia dell'Etna » se réfère à la production dans la zone du volcan Etna, où le cultivar italien à chair blanche 'Trunzara Bianca' est le plus important grâce à sa chair ferme et sa maturation précoce en été (juillet-août).
- « Ficodindia de San Cono » se réfère à la plus importante zone de culture de figuier de Barbarie en Italie où les trois principaux cultivars poussent ('Gialla', 'Rossa' et 'Bianca').

Selon la FIA (2010), le potentiel agro-industriel des pays tels que le Mexique et l'Italie a permis le développement d'une variété d'alternatives pour le secteur agro-alimentaire, par exemple, la farine, les tortillas, les confitures, les compléments, les confiseries, les snacks, les produits surgelés et les jus. Cependant, en Italie, le secteur est limité à quelques liqueurs et - à une très petite échelle - les confitures, alors que l'intérêt et le commerce des sous produits pour les alicaments et les

utilisations médicinales connaît une expansion rapide. Sáenz *et al.*, eds (2006) montrent qu'il y a un nombre significatif de produits qui peuvent être obtenus à partir des diverses parties de la plante, voire plus en exploitant les écotypes à fruits colorés. Le fruit peut être utilisé pour préparer un grand nombre de produits, incluant les confitures, liqueurs et vinaigres, sauces, jus concentrés et des produits en conserve. D'autre part, la poudre de cladodes peut être utilisée comme aliment fonctionnel et ingrédient colorant, alors que d'autres composés bioactifs encapsulés agissent comme agents colorants (Sáenz *et al.*, 2009). Plus spécifiquement, beaucoup d'ingrédients fonctionnels sont caractérisés par leurs effets bénéfiques sur la santé, grâce aux fibres, aux hydrocolloïdes (mucilage), pigments (bétalaines et caroténoïdes), minéraux (calcium, potassium) et aux vitamines (par exemple la vitamine C), qui sont présents dans les fruits et les cladodes (Piga, 2004 ; CEZA, 2011).

La plupart des consommateurs de figues de Barbarie fraîches se concentrent sur les attributs intrinsèques, parce qu'il n'y a pratiquement eu aucun développement des attributs extrinsèques. Les signaux intrinsèques sont liés aux aspects physiques d'un produit, tels que la couleur, la taille, la texture, la forme et l'apparence (Mora *et al.*, 2011 ; Sulé *et al.*, 2002).

Les signaux extrinsèques sont liés au produit, mais ne font pas partie de son essence, par exemple : la marque, l'emballage, le signe de qualité, le prix, l'AOC, la boutique, la force de vente et les informations sur la production. Migliore *et al.* (2015a) signalent que des attributs importants de crédibilité pour le marché Italien sont la durabilité environnementale, la qualité pour la santé et l'origine italienne.

VALEUR DES ATTRIBUTS ET PRÉFÉRENCES DES CONSOMMATEURS

Au Chili, il y a 17 écotypes du genre *Opuntia*, probablement introduits depuis le Mexique par les Espagnols; la variété verte (*Opuntia ficus-indica*) est actuellement la plus commercialisée (Sudzuki *et al.*, 1993). Dans ce contexte, une étude sur les préférences en figues de Barbarie, développée par notre groupe (Matamala *et al.*, 2015) s'est focalisée sur l'étude de six écotypes de différentes couleurs, et a évalué les attributs intrinsèques, tels que le poids, le nombre de graines, l'épaisseur de la peau, la couleur interne et externe et la douceur. Selon Mokoboki *et al.* (2009), un poids d'environ 120 g est un attribut positif pour le marché. L'épaisseur de l'enveloppe et les graines ont aussi un impact commercial (FIA, 2010). Les fruits verts sont préférés par la population chilienne, alors que les figues de Barbarie jaunes sont les plus consommées dans le monde et les rouges sont les plus attractives pour les consommateurs néophytes (Migliore *et al.*, 2015a).



Matamala *et al.* (2015) ont identifié trois segments préliminaires de marché : i) traditionnel, consommation régulière de figues de Barbarie ; ii) sporadique, consommation occasionnelle ; et iii) sceptique à propos des caractéristiques du produit. D'autre part, Esparza (2015) identifie trois segments de marché de consommateurs : i) « pratiques » (48.8% de la population enquêtée) ; ii) « essentiels » (18.5%) ; et iii) « santé » (13.5%). En général, le prix était l'attribut le plus important, suivi par le lieu d'origine et finalement par la couleur de la chair. Il existe aussi un segment de marché potentiel qui est attiré par l'achat de figues de Barbarie les moins transformées possible.

Migliore *et al.*, (2015a, b) rapportent des découvertes similaires sur le marché italien. Inglese *et al.* (1995b) indiquent que, pour les chercheurs, le défi est lié calibre réduit du fruit et le nombre élevé de graines, combinés avec une mauvaise promotion et des problèmes de standardisation de la qualité. De plus, il y a d'autres attributs liés à un niveau émotionnel: l'humeur et les émotions sont des facteurs qui constituent les bases de la motivation du processus d'achat. En ce qui concerne la figue de Barbarie, Chironi et Ingrassia (2015) rapportent trois profils de consommateurs. Le premier analyse la figue de Barbarie, non seulement les éléments qualitatifs et sensoriels, mais aussi en relation avec les nouveaux besoins hédonistes. Le second associe l'image du fruit avec le territoire. Le troisième permet aux consommateurs de développer des besoins secondaires, augmentant les chances de surpasser les limitations liées à ce fruit.

STRATÉGIE DE DÉVELOPPEMENT COMMERCIAL PROPOSÉE POUR LES FIGUES DE BARBARIE FRAICHES ET SES PRODUITS

Callejas *et al.* (2009) fournissent des instructions générales pour un meilleur produit en termes d'aspect, de qualité, de valeur ajoutée et de prix compétitif.

Prix

Cette variable dépend beaucoup des choses faites de la bonne manière; cependant, dans une chaîne de valeur compétitive, les prix des figues de Barbarie sont potentiellement attractifs. Augmenter la compétitivité à travers des performances de qualité améliorées (sur la base d'un rendement d'environ 12 tonnes ha⁻¹, c'est-à-dire 600 boîtes - 20% de plus que la production actuelle dans une plantation du centre du Chili) résulteraient en un prix moyen estimé de 6000 pesos chiliens (8.75 \$ US) par boîte premium (l'offre de prix de gros la plus

basse est prévue). Cela générerait un chiffre d'affaire de 3.6 millions de pesos chilien (5 251 \$ US) ha⁻¹.

L'expérience italienne indique que les fruits du meilleur calibre (classés A ou AA) peuvent atteindre un prix de 1.5-3 € à la ferme, alors que les plus petites tailles montrent une forte diminution du prix, 30 à 40% de moins pour des fruits de la classe B et encore moins pour les fruits de la classe C. Par conséquent, seule une gestion correcte de la culture permet d'atteindre les meilleurs résultats sur le marché, en cultivant des figues de Barbarie de la classe A, sans glochides ni défauts, récoltées au stade de maturation approprié et avec une adéquate proportion de chair (55 - 65%) (Inglese *et al.*, 2002a).

Produit

La qualité telle qu'elle est perçue par le consommateur dépend principalement des attributs intrinsèques du fruit. Certains aspects requièrent des améliorations pour atteindre, par exemple, une taille uniforme, un épiderme fin et moins de graines. Pour les figues de Barbarie fraîches au Chili, la préférence va aux cultivars verts et jaunes. Les figues de Barbarie jaunes (Inglese *et al.*, 2002a) et rouges (Migliore *et al.*, 2015a) sont les plus appréciées sur le marché italien. De plus, il y a un espace de marché croissant pour les figues de Barbarie minimalement transformées, en particulier dans la restauration publique et les sections réfrigérées des supermarchés. Des recherches sont nécessaires pour explorer le potentiel de marché des autres dérivés du figuier de Barbarie, tels que les confitures, la farine, les jus, les concentrés et les produits fonctionnels. Enfin, pour un produit de qualité préféré par les consommateurs, l'innovation des activités primaires de la chaîne de valeur est nécessaire: il est nécessaire d'améliorer les techniques de culture, avec une attention particulière pour les pratiques biologiques (Timpanaro *et al.*, 2015b; Migliore *et al.*, 2015a).

Promotion et publicité

En général, la figue de Barbarie est un produit connu et consommé par une partie spécifique du marché. Une stratégie de communication doit par conséquent présenter les attributs intrinsèques - les ingrédients fonctionnels avec les effets bénéfiques sur la santé, tels que les fibres, les pigments (bétalaïnes et caroténoïdes), les minéraux (calcium, potassium) et vitamines (par exemple la vitamine C) - et les faire connaître à un plus large public. Les actions de communication associées à des politiques publiques sont essentielles et sont recommandées pour le figuier de Barbarie et ses produits dérivés.



CONCLUSIONS

Les producteurs de figues de Barbarie à travers le monde font face à des défis similaires en ce qui concerne l'amélioration de la chaîne de valeur. Les principaux problèmes sont soulignés ci-dessous :

- Des systèmes d'irrigation sont nécessaires au niveau de la production, puisque le figuier de Barbarie pousse dans des lieux caractérisés par le manque d'eau.
- La qualité des fruits doit être améliorée, avec une attention particulière pour les attributs intrinsèques associés à l'homogénéité.
- Des stratégies de marketing sont nécessaires. Comme les producteurs de figues de Barbarie sont généralement petits et manquent de ressources pour accéder aux technologies modernes, il est recommandé qu'ils développent des associations pour améliorer l'organisation, optimiser les ressources et gérer l'importante asymétrie et les échecs inhérents aux marchés.
- Une information plus actualisée doit être rendue disponible, spécialement en ce qui concerne les marchés, les coûts, les prix et la qualité. Les principaux pays producteurs pourraient développer un projet commun pour la production d'une base de données avec des informations standardisées et des mises à jour économiques et commerciales.
- Le rôle social joué par le figuier de Barbarie dans ses zones de production doit être reconnu. Les politiques publiques devraient être mises en place pour aider les associations à améliorer les résultats techniques et économiques et pour générer des innovations tout au long de la chaîne de valeur, dans les activités primaires et secondaires. Le but est d'améliorer le niveau de compétitivité et de bien-être des personnes vivant dans ces territoires.
- La recherche sur les marchés est nécessaire pour comprendre les intérêts potentiels pour les produits

préparés à partir de figues de Barbarie et de cladodes. Beaucoup d'attributs intéressants pourraient être bien reçus sur le marché. Des systèmes d'assurance de qualité doivent être installés pour les produits transformés puisqu'ils sont des outils essentiels pour les vendeurs distribuant de tels produits.

- Le développement des **attributs intrinsèques** des figues de Barbarie est au centre de beaucoup de stratégies de marketing :
 - Améliorer les systèmes actuels de production (productivité et qualité).
 - Mener à bien des études de faisabilité économique et technique pour évaluer le potentiel de production et de commercialisation des marchés nationaux et internationaux.
 - Explorer la réceptivité des consommateurs pour les nouveaux produits développés par les centres de recherche (principalement agro-industriels), les amener au stade de prototype et continuer les tests et la validation de marché.
 - Communiquer sur les attributs intrinsèques qui créent la valeur mais qui ne sont pas connus du consommateur moyen.
 - Explorer les nouveaux canaux de commercialisation, tels que les boutiques spécialisées, les entreprises de restauration, les compagnies pharmaceutiques et internet.
 - Continuer la recherche pour réduire le nombre de graines.
 - Développer les figues de Barbarie minimalement transformées.
 - Elaborer et communiquer sur les attributs de confiance avec un étiquetage de sûreté alimentaire, qualité, aspects nutritionnels et environnementaux.
- Le développement des **attributs extrinsèques** (emballage et étiquetage) est aussi essentiel pour la valeur ajoutée.



Bibliographie

- Abdelouahed Kidiss.** 2016. *Cochenille du cactus: la «handia» marocaine en péril?* (available at <http://fr.le360.ma/economie/cochenille-du-cactus-la-handia-marocaine-en-peril-81079>).
- Abidi, S., Ben Salem, H., Vasta, V. & Priolo, A.** 2009a. Spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cladodes in the diet of lambs and kids: Digestion, growth and intramuscular fatty acid composition. *Small Ruminant Res.*, 87: 9–16.
- Abidi, S., Ben Salem, H., Martín García, A.I. & Molina Alcaide, E.** 2009b. Ruminal fermentation of spiny (*Opuntia amyclae*) and spineless (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cactus cladodes and diets including cactus. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 149: 333–340.
- Abidi, S., Ben Salem, H., Nefzaoui, A., Vasta, V. & Priolo, A.** 2013. Silage composed of *Opuntia ficus-indica* f. *inermis* cladodes, olive cake and wheat bran as alternative feed for barbarine lamb. *Acta Hortic.*, 995: 297–302.
- Acevedo, E. & Doussoulin, E.** 1984. Productividad de la tuna en el área de Til Til. *Tecnología y Agricultura*, 29(June–July): 18–22.
- Acevedo, E., Badilla, I. & Nobel, P.S.** 1983. Water relations, diurnal acidity changes and productivity of a cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.*, 72(3): 775–780.
- Agence Ecofin.** 2015. *L'Algérie s'enorgueillit de sa première usine de transformation de figue de barbarie* (available at <http://www.agenceecofin.com/fruits/0510-32871-l-algerie-s-enorgueillit-de-sa-premiere-usine-de-transformation-de-figue-de-barbarie>).
- Aguilar Z.A.** 2007. *Nopal verdura*. Memoria del 1er Congreso de Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria y Forestal en el Distrito Federal, 24–25 septiembre 2007. 120 pp.
- Aguilar, B.G. & Chàvez, F.S.** 1995. Frutos partenocarpicos de nopal (*Opuntia amyclae*) mediante la inducción de esterilidad masculina. In E. Pimienta Barrios, L.C. Neri, U.A. Muñoz & M.F.M. Huerta, eds. Memoria del VI Congreso Nacional y IV Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Guadalajara, Mexico, Universidad de Guadalajara, pp. 136–138.
- Aguilar Sánchez, L., Martínez Damián, M.A., Barrientos Priego, A.F., Aguilar Gallegos, N. & Gallegos Vásquez, C.** 2007. Potencial de oscurecimiento enzimático de variedades de nopalito. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 9: 165–184.
- Ahmad, A., Davies, J., Randall, S. & Skinner, G.R.B.** 1996. Antiviral properties of extract of *Opuntia streptacantha*. *Antiviral Res.*, 30: 75–85.
- Ahmed, M.S., El Tanbouly, N.D., Islam, W.T., Sleem, A.A. & El Senousy, A.S.** 2005. Anti-inflammatory flavonoids from *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw. Flowers growing in Egypt. *Phytother. Res.*, 19: 807–809.
- Ait Hamou, A.** 2007. An overview on medicinal and cosmetic uses of cactus in Morocco. *Cactusnet Newsletter*, 11: 51–56.
- Alary, V., Nefzaoui, A., Ben Jemaa, M.** 2007. Promoting the adoption of natural resource management technology in arid and semi arid areas: Modelling the impact of spineless cactus in alley cropping in Central Tunisia. *Agric. Syst.*, 94: 573–585.
- Alfaro, F.** 2014. *Estabilidad de betalainas en yogur adicionado con microparticulas de pulpa o ultrafiltrado de tuna púrpura* (*Opuntia ficus-indica*). Santiago, Faculty of Agronomical Science, University of Chile (Masters thesis).
- Alimi, H., Hfaeidh, N., Mbarki, S., Bouoni, Z., Sakly, M. & Ben Rouma, K.** 2012. Evaluation of *Opuntia ficus-indica* f. *inermis* fruit juice hepatoprotective effect upon ethanol toxicity in rats. *Gen Physiol. Biophys.*, 31: 335–342.
- Alkämper, J.** 1984. Chancen und Risiken im Anbau und in der Nutzung von Opuntien. *Giessener Beitr. Entwicklungsforsch.*, 11: 9–14.
- Allegra, M., Furtmüller, P.G., Jantschko, W., Zederbauer, M., Tesoriere, L., Livrea, M.A. & Obinger, C.** 2005. Mechanism of interaction of betanin and indicaxanthin with human myeloperoxidase and hypochlorous acid. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 332: 837–844.
- Allegra, M., Ianaro, A., Tersigni, M., Panza, E., Tesoriere, L. & Livrea, M.A.** 2014. Indicaxanthin from cactus pear fruit exerts anti-inflammatory effects in carrageenin-induced rat pleurisy. *J. Nutr.*, 144: 185–192.
- Allegra, A., Sortino, G., Miciletta, G., Riotta, M., Fasciana, T. & Inglese, P.** 2015. The influence of harvest period and fruit ripeness at harvest on minimally processed cactus pears (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) stored under passive atmosphere. *Postharvest Biol. Technol.*, 104: 57–62.
- Alzate & Ramírez, J.** 1777. Memoria en que se trata del insecto grana o cochinilla, de su naturaleza y serie de su vida, como también del método para propagarla y reducirla al estado en que forma uno de los ramos más útiles del comercio. *La Naturaleza, Soc. Mex. Hist. Nat.*, 6(1882–1884): 97–151.
- Ammar, M.I., Shltout, A.M. & Kamhaway, M.A.** 2004. Cladode and fruits rots of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) in Egypt. *Egypt. J. Phytopathol.*, 32: 119–128.
- Ammar, I., Ennouri, M., Khemakhem, B., Yangui, T. & Attia, H.** 2012. Variation in chemical composition and biological activities of two species of *Opuntia* flowers at four stages of flowering. *Ind. Crops Prod.*, 37: 34–40.
- Anderson, E.F.** 2001. *The cactus family*. Portland, Oregon, USA, Timber Press. 779 pp.
- Andrade, C.T.** 2008. *Cactus úteis na Bahia*. Pelotas, Brazil, Ed. USEB.
- Andrade, J.L., de la Barrera, E., Reyes García, C., Ricalde, M.F., Vargas Soto, G. & Cervera, J.C.** 2007. El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Bol. Soc. Bot. Mex.*, 81: 37–50.
- Andrade, J.L., Cervera, J.C. & Graham, E.A.** 2009. Microenvironments, water relations, and productivity of CAM plants. In E. de la Barrera & W. Smith, eds. *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: a tribute to Park S. Nobel*, pp. 95–120. Mexico City, UNAM.
- Anegay, K. & Boutoba, A.** 2010. *Prickly pear cactus in Southern Morocco regions – from historical patrimony to technological future*. Proceedings of the VII International Congress on Cactus Pear and Cochineal, 17–22 October 2010, Agadir, Morocco.
- Annecke, D.P. & Moran, V.C.** 1978. Critical reviews of biological pest control in South Africa. 2. The prickly pear, *Opuntia ficus-indica* (L) Miller. *J. Entomol. Soc. South Afr.*, 41: 161–188.
- Anon.** 2014. National Environmental Management Biodiversity Act (10/2004): Alien and Invasive Species Regulations. R. 598. Government Gazette No. 37885.
- Aounallah, M.K., Jebari, A. & Nefzaoui, A.** 2005. Characterization of three *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller cultivars grown at Cap Bon (Tunisia) and their reblooming capacity. *Cactusnet Newsletter*, 9: 3–7.
- Aquilar, A.A.** 1997. Efecto del riego y fertilización sobre el adelanto de floación y cosecha de nopal tunero vc. 'Reyna' en el Estado de Mexico. In Proceedings of the Seventh National and Fifth International Congress on Cactus Pear, Monterrey, Mexico, pp. 140–141.
- Aquino, P.G.** 1992. Factores limitantes en el cultivo de la cochinilla (*Dactylopius* spp.) del nopal (*Opuntia* spp.) en el Altiplano Potosino. En Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Memorias del 5to Congreso Nacional y 3º Internacional, Chapingo, Mexico, pp. 75–76.
- Aquino, L.V., Rodríguez, J., Mendez, L.L. & Kenia, F.T.** 2009. Inhibition of the darkening with cactus mucilage (*Opuntia ficus-indica*) during drying of banana Roatán. *Inf. Tecnol.*, 20(4): 15–20.
- Aquino, E., Chavarría, Y., Chávez, J., Guzmán, R., Silva, E. & Verdalet, I.** 2012. Caracterización físicoquímica de siete variedades de tuna (*Opuntia* spp.) color rojo-violeta y estabilidad del pigmento de las dos variedades con mayor concentración. *Invest. Cienc.*, 55: 3–10.
- Araújo, L.F., Medeiros, A.N., Neto, A.P., Oliveira, L.S.C. & Silva, F.L.H.** 2005. Protein enrichment of cactus pear (*Opuntia ficus indica* Mill.) using *Saccharomyces cerevisiae* in solid-state fermentation. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 48: 161–168.
- Arba, M.** 2009a. *Le cactus opuntia, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc* (available at http://agrimaroc.net/agdumed2009/Arba_cactus_opuntia_espece_fruitiere_fourragere.pdf).
- Arba, M.** 2009b. Rooting of one year and second year old cladodes of cactus pear. *Acta Hortic.*, 811: 303–307.
- Arba, M. & Benrachid, K.** 2013. Effect of irrigation on the rooting of one-year-old cladodes of cactus pear. *Acta Hortic.*, 995: 139–144.
- Arba, M., Benismail, M.C. & Mimoun, M.** 2002. The Cactus pear (*Opuntia* spp.) in Morocco: Main species and cultivar characterization. *Acta Hortic.*, 581: 103–106.
- Arba, M., Choukallah, R., Falisse, A. & Paul, R.** 2015a. Phenology of flowering and fruiting of cactus pear and effect of NP fertilizing. *Acta Hortic.*, 1067: 31–38.
- Arba, M., Choukallah, R., Sindic, M., Paul, R. & Falisse, A.** 2015b. Effect of NP fertilizing on fruit yield and fruit quality of cactus pear. *Acta Hortic.*, 1067: 39–46.
- Archibald, E.E.A.** 1935. The development of the ovule and seed of jointed cactus (*Opuntia aurantiaca* Lindley). *S. Afr. J. Sci.*, 36: 195–211.
- Arias Jiménez, E.** 2013a. Importancia de la tuna. *Cactusnet Newsletter*, 13: 9–12.
- Arias Jiménez, E.** 2013b. *Preámbulo: Importancia de la tuna* [Cactus pear importance]. Proceedings of the Second Meeting for the Integral Use of Cactus Pear and Other Cacti and First South American Meeting of the FAO-ICARDA CactusNet, 12–19 September 2012, Santiago del Estero, Argentina. 175 pp.
- Askar, A. & El Samahy, S.K.** 1981. Chemical composition of prickly pear fruits. *Dtsch. Lebensm.-Rundsch.*, 77: 279–281.
- Astello Garcia, M.G., Cervantes, I., Nair, V., Santos Diaz, M.d.S., Reyes Agüero, A., Guéraud, F., Negre Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros Zevallos, L. & Barba de la Rosa, A.P.** 2015. Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *J. Food Compos. Anal.*, 43: 119–130.
- Atti, N., Mahouachi, M. & Rouissi, H.** 2006. The effect of spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) supplementation on growth, carcass, meat quality and fatty acid composition of male goat kids. *Meat Sci.*, 73: 229–235.

- Ayadi, M.A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M. & Attia, H.** 2009. Cladodes from *Opuntia ficus-indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Ind. Crops Prod.*, 30: 40–47.
- Azaredo, H.M.C.** 2009. Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 44: 2365–2376.
- Azocar, P.** 2001. *Opuntia* use as feed for ruminants in Chile. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 57–61. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Baca Castillo, G.A.** 1988. Deficiencias nutricionales inducidas en nopal proveniente de cultivo in vitro. En Memórias Reuniao Nacional e International Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Universidad Autónoma Agraria, Saltilho, pp. 155–163.
- Baccouche, A., Ennouri, M., Felfoul, I. & Attia, H.** 2013. A physical stability study of whey-based prickly pear beverages. *Food Hydrocolloids*, 33: 234–244.
- Bae, J.S. & Huh, M.W.** 2006. The dyeability and antibacterial activity of wool fabric dyed with cochineal. *J. Korean Soc. Dyers and Finishers*, 18: 22–29.
- Baeza, F.** 1995. *Aprovechamiento del desecho del cultivo de cactáceas Opuntia cacti (tunales) para producción de biogás*. Santiago, Faculty of Physical Sciences and Mathematics, University of Chile (Civil Engineering thesis). 132 pp.
- Bai, F., Wu, J., Gong, G. & Guo, L.** 2015. Biomimetic “cactus spine” with hierarchical groove structure for efficient fog collection. *Adv. Sci.*, 2: 1500047.
- Bailey, I.W.** 1961. Comparative anatomy of the leaf-bearing Cactaceae. II. Structure and distribution of sclerenchyma in the phloem of *Pereskia*, *Pereskopsis* and *Quiabentia*. *J. Arnold Arbor.*, 42: 144–156.
- Barbera, G.** 1984. Ricerche sull'irrigazione del ficodindia. *Frutticoltura*, 46: 49–55.
- Barbera, G.** 1994. *Il ruolo del ficodindia nell'agricoltura delle regioni aride e semi-aride*. Proceedings of the Academy of Sciences, Arts and Letters, Palermo, Italy.
- Barbera, G.** 1995. History, economic and agro-ecological importance. In G. Barbera, P. Inglese, & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, p. 1–11. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Barbera, G. & Inglese, P.** 1993. *La coltura del ficodindia*. Bologna, Italy, Edagricole.
- Barbera, G. & Inglese, P.** 2001. *Fico d'india*. L'Epos Società Editrice. 217 pp.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1988. La coltura del ficodindia e possibili indirizzi produttivi. *Frutticoltura*, 10: 37–43.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1991. The reflowering of prickly pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, influence of removal time and cladode load on yield and fruit ripening. *Adv. Hortic. Sci.*, 5: 77–80.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1992a. Past and present role of the Indian-fig prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, Cactaceae) in the agriculture of Sicily. *Econ. Bot.*, 46: 10–22.
- Barbera, G., Carimi, F., Inglese, P. & Panno, M.** 1992b. Physical, morphological and chemical changes during fruit development and ripening in three cultivars of prickly pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *J. Hortic. Sci.*, 67(3): 307–312.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1993a. Effects of GA₃ and shading on return bloom of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *J. South. Afr. Soc. Hortic. Sci.*, 3: 9–10.
- Barbera, G., Carimi, F. & Inglese, P.** 1993b. Influenza dell'epoca di impianto e del tipo di talea sulla radicazione e sullo sviluppo di barbatelle di *O. ficus-indica* Mill. *Frutticoltura*, 10: 67–71.
- Barbera, G., Inglese, P. & La Mantia, T.** 1994. Seed content and fruit characteristics in cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Miller). *Sci. Hortic.*, 58: 161–165.
- Barbera, G., Inglese, P. & Pimienta Barrios, E., eds.** 1995. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Barcikowski, W. & Nobel, P.S.** 1984. Water relations of cacti during the desiccation: distribution of water in tissues. *Bot. Gaz.*, 145: 110–115.
- Barthlott, W., Burstedde, K., Geffert, J.L., Ibsch, P.L., Korotkova, N., Miebach, A., Rafiqpoor, M.D., Stein, A. & Mutke, J.** 2015. Biogeography and biodiversity of cacti. *Schumannia*, 7: 1–205.
- Basile, F.** 1990. *Indagine economica-agraria sulla produzione del ficodindia in Italia*. Catania, Italy, Faculty of Agrarian Studies, University of Catania, Institute of Agrarian Economics and Politics.
- Basile, F. & Foti, V.T.** 1997. Economic features of cactus pear production in Italy. *Acta Hortic.*, 438: 139–150.
- Batista, A.M., Mustafa, F.A., McAllister, T., Wang, Y., Soita, H. & McKinnon, J.J.** 2003a. Effects of variety on chemical composition, *in situ* nutrient disappearance and *in vitro* gas production of spineless cacti. *J. Sci. Food Agric.*, 83: 440–445.
- Batista, A.M.V., Mustafa, A.F., Santos, G.R.A., De Carvalho, F.F.R., Dubeux, J.C.B., Lira, M.A. & Barbosa, S.B.P.** 2003b. Chemical composition and ruminal dry matter and crude protein degradability of spineless cactus. *J. Agron. Crop Sci.*, 189: 123–126.
- Batista, E., Cavalcanti, I., De Brito, C.H. & De Luna, J.** 2009. Velocidade de infestação e dispersão de *Dactylopius opuntiae* Cockerell, 1896 em palma gigante na Paraíba. *Engenharia Ambiental – Espirito Santo do Pinhal*, 6(1): 196–205.
- Bazzano, L.A., He, J., Ogden, L.G., Loria, C.M., Vupputuri, S., Myers, L. & Whelton, P.K.** 2002. Fruit and vegetable intake and risk of cardiovascular disease in US adults: the first national health and nutrition examination survey epidemiologic follow-up study. *Am. J. Clin. Nutr.*, 76: 93–99.
- Beaulieu, J.C. & Gorny, J.R.** 2004. Fresh-cut fruits. In C.K. Gross, C.Y. Wang & M. Saltveit, eds. *The commercial storage of fruits, vegetables, florist and nursery stocks*. USDA Handbook No. 66. Washington, DC (available at <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/fresh-cutFruits.pdf>).
- Beccaro, G.L., Bonvegna, L., Donno, D., Mellano, M.G., Cerutti, A.K., Nieddu, G., Chessa, I. & Bounous, G.** 2015. *Opuntia* spp. biodiversity conservation and utilization on the Cape Verde Islands. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 62(1): 21–33.
- Becerril, A.** 1997. *Porcentaje de aceite en semillas de nopal (Opuntia ficus-indica)*. Memorias VII Congreso Nacional y V Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Monterrey, Mexico.
- Behailu, M. & Tegegne, F., eds.** 1997. *Opuntia in Ethiopia: state of knowledge in Opuntia research*. Proceedings of the International Workshop, 23–27 February 1997. Mekelle University, Ethiopia and Wiesbaden Polytechnic, Germany. 246 pp.
- El Behi, A.W., Orlandi, F., Bonofiglio, T., Romano, B., Fornaciari, M., Inglese, P., Sortino, G. & Liguori, G.** 2015. Pollen morphology and reproductive performances in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Acta Hortic.*, 1067: 558–562.
- Beinart, W.** 2003. *The rise of conservation in South Africa. Settlers, livestock and the environment 1770–1950*. UK, Oxford University Press.
- Beinart, W. & Wotshela, L.** 2011. *Prickly pear. The social history of a plant in the Eastern Cape*. Wits University Press.
- Bekir, E.A.** 2006. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) in Turkey: Growing regions and pomological traits of cactus pear fruits. *Acta Hortic.*, 728: 51–54.
- Belay, T.** 2015. Carmine cochineal: fortune wasted in northern Ethiopia. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 17: 61–80.
- Belgacem, M.** 2012. *Algeria: Valorization du fruit de figuier de Barbarie* (available at <http://dzagro.net/forums/viewtopic.php?f=97&t=2396>).
- El Beltagy, A.** 1999. Can desertification trends be reversed in west Asia and North Africa? In *New technologies to combat desertification*, pp. 65–78. Tehran, Ministry of Agriculture.
- Bendhifi, M., Baraket, G., Zourgui, L., Souid, S. & Salhi Hannachi, A.** 2013. Assessment of genetic diversity of Tunisian Barbary fig (*Opuntia ficus indica*) cultivars by RAPD markers and morphological traits. *Sci. Hortic.*, 158: 1–7.
- Ben Salem, H. & Abidi, S.** 2009. Recent advances on the potential use of *Opuntia* spp. in livestock feeding. *Acta Hortic.*, 811: 317–326.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A., Abdouli, H. & Ørskov, E.R.** 1996. Effect of increasing level of spineless cactus (*Opuntia ficus indica* var. *inermis*) on intake and digestion by sheep fed straw-based diets. *Anim. Sci.*, 62: 293–299.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A. & Ben Salem, L.** 2002a. Supplementation of *Acacia cyanophylla* Lindl. foliage-based diets with barley or shrubs from arid areas (*Opuntia ficus indica* var. *inermis* and *Atriplex nummularia* L.) on growth and digestibility in lambs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 96: 15–30.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A. & Ben Salem, L.** 2002b. Supplementing spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) based diets with urea-treated straw or oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.). Effects on intake, digestion and growth. *J. Agric. Sci. (Cambridge)*, 138: 85–92.
- Ben Salem, H., Ben Salem, I., Nefzaoui, A. & Ben Said, M.S.** 2003. Effect of PEG and olive cake feed blocks supply on feed intake, digestion, and health of goats given kermes oak (*Quercus coccifera* L.) foliage. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 110: 45–49.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A. & Ben Salem, L.** 2004. Spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) and oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) as alternative supplements for growing Barbarine lambs given straw-based diets. *Small Ruminant Res.*, 51: 65–73.
- Benson, L.** 1982. *The cacti of the United States and Canada*. Stanford, California, USA, Stanford University Press.
- Benson, L. & Walkington, D.L.** 1965. The southern California prickly pears – invasion, adulteration and trial by fire. *Ann. Mo. Bot. Gard.*, 52: 262–273.

- Berdan, F.R. & Anwalt, P.R.** 1992. *The Codex Mendoza*. Berkeley, California, USA, University of California Press.
- Bergaoui, A., Boughalleb, N., Ben Jannet, H., Harzallah Shiric, F., El Mahjoub, M. & Mighri, Z.** 2007. Chemical composition and antifungal activity of volatiles from three *Opuntia* species growing in Tunisia. *Pakistan J. Biol. Sci.*, 10: 2485–2489.
- Berger, A.** 1905. *Opuntia ficus-indica* Mill. *Monatsschr. Kakteenk.*, 15: 153–154.
- Berger, A.** 1912a. *Kakteen*. Stuttgart, Eugen Ulmer.
- Berger, A.** 1912b. *Hortus Mortolensis*. London, West Newman & Co.
- Bernués, A., Olaizola, A. & Corcoran, K.** 2003. Extrinsic attributes of red meat as indicators of quality in Europe: an application for market segmentation. *Food Qual. Prefer.*, 14(4): 265–276.
- Berraouan, A., Abderrahim, Z., Hassane, M., Abdelkhaleq, L., Mohammed, A. & Mohamed, B.** 2015. Evaluation of protective effect of cactus pear seed oil (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) against alloxan-induced diabetes in mice. *Asian Pac. J. Trop. Med.*, 530–535.
- Berry, W.L. & Nobel, P.S.** 1985. Influence of soil and mineral stresses on cacti. *J. Plant Nutr.*, 8: 679–696.
- Bertaccini, A., Calari, A. & Felker, P.** 2007. Developing a method for phytoplasma identification in cactus pear samples from California. *Bull. Insectol.*, 60: 257–258.
- Billett, R.** 1987. Prickly profit makers. *Farmers Weekly*, Mar: 31–33.
- Black, C.C. & Osmond, C.B.** 2003. Crassulacean acid metabolism photosynthesis: working the night shift. *Photosynth Res.*, 76: 329–341.
- Blanco Macías, F., Lara Herrera, A., Valdez Cepeda, R.D., Cortés Bañuelos, J.O., Luna Flores, M. & Salas Luevano, M.A.** 2006. Interacciones nutrimentales y normas de la técnica de nutrimento compuesto en nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller). *Rev. Chapingo Ser. Hortic.*, 12(2): 165–175.
- Blanco Macías, F., Magallanes Quintanar, R., Valdez Cepeda1, R.D., Vázquez Alvarado, R., Olivares Sáenz, E., Gutiérrez Ornelas, E., Vidales Contreras, J.A. & Murillo Amador, B.** 2010. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173: 927–934.
- BOE (Boletín Oficial del Estado).** 2001. *Normas de higiene para la elaboración, distribución y comercio de comidas preparadas*. Real Decreto 3484/2000, pp. 1435–1441. Madrid.
- Boke, N.H.** 1944. Histogenesis of the leaf and areole in *Opuntia cylindrica*. *Am. J. Bot.*, 31: 299–316.
- Boke, N.H.** 1980. Developmental morphology and anatomy in Cactaceae. *BioScience*, 30: 605–610.
- Borland, A.M. & Dodd, A.N.** 2002. Carbohydrate partitioning in CAM plants: reconciling potential conflicts of interest. *Funct. Plant Biol.*, 29: 707–716.
- Borrego Escalante, F., Murillo Soto, M.M. & Parga Torres, V.M.** 1990. *Potencial de producción en el norte de México de variedades de nopal* (*Opuntia* spp.). Proceedings of the First Annual Texas Prickly Pear Council, 21 July 1990, Caesar Kleberg Wildlife Research Institute, Kingsville, Texas, USA. 95 pp.
- Boujghagh, M. & Bouharrou, R.** 2015. Influence of the timing of flowers and young cladodes removal on reflowering and harvest periods, yields and fruit quality of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*). *Acta Hortic.*, 1067: 79–82.
- Boyle, T.H. & Anderson, E.F.** 2002. Biodiversity and Conservation. In P. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 125–141. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Brahmi, D., Bouaziz, C., Ayed, Y., Ben Mansour, H., Zourgui, L. & Bacha, H.** 2011. Chemopreventive effect of cactus *Opuntia ficus-indica* on oxidative stress and genotoxicity of aflatoxin B1. *Nutr. Metab.*, 8: 73–89.
- Brailovsky, H., Barrera, E., Mayorga, C. & Ortega Leon, G.** 1994. Estadios ninfales de los coreidos del Valle de Tehuacan, Puebla (Hemiptera: Heteroptera) I. Chelinea staffiles, C. tabulata y Narnia femorata. *An. Inst. Biol., Univ. Nac. Auton. Mex., Ser. Zool.*, 65(2): 241–264.
- Bravo Hollis, H.** 1978. *Las cactáceas de México*. Vol. 1. Mexico City, National Autonomous University of Mexico. 743 pp.
- Bravo Hollis, H. & Sánchez Mejorada, H.** 1991. *Las cactáceas de México*. Vol. 3. Mexico D.F., National Autonomous University of Mexico.
- Bravo Hollis, H. & Scheinvar, L.** 1995. *El interesante mundo de las cactáceas*. Mexico, National Council of Science and Technology.
- Breedt, H.J.** 1996. *Principles of sub-tropical crop, cultivar and rootstock recommendations. Short course in sub-tropical fruit production*. Nelspruit, Mpumalanga, South Africa, ARC Institute for Tropical and Sub-tropical Crops. 19 pp.
- Brickell, C.D., Alexander, C., David, J.C., Heterscheid, W.L.A., Leslie, A.C., Malecot, V., Jin, X. & Cubey, J.J., eds.** 2009. *International code of nomenclature for cultivated plants*. Ed. 8. *Scr. Hortic.* 10: 1–184.
- Britton, N.L. & Rose, N.** 1919. *The Cactaceae*. Vol. 1. Washington, DC, Smithsonian Institution.
- Brutsch, M.O.** 1979. The prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) as a potential fruit crop for the drier regions of the Ciskei. *Crop Prod.*, 8: 131–137.
- Brutsch, M.O.** 1992. Crop manipulation in spineless prickly pear *Opuntia ficus-indica* in South Africa. In Proceedings of the Second International Conference on Prickly Pear and Coccinea, 22–25 September, Santiago, pp. 40–47.
- Brutsch, M.O.** 1997a. An overview of the South African cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) industry. Paper presented at the Workshop on *Opuntia* in Ethiopia. University of Mekelle, Tigray, Ethiopia, 23–27 February 1997.
- Brutsch, M.O.** 1997b. Climatic data of selected cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) growing areas in South Africa. *Acta Hortic.*, 438: 13–20.
- Brutsch, M.O. & Scott, M.B.** 1991. Extending the fruiting season of spineless prickly pear (*Opuntia ficus-indica*). *J. South. Afr. Soc. Hortic. Sci.*, 1(2): 73–76.
- Brutsch, M.O. & Zimmermann, H.G.** 1993. The prickly pear (*Opuntia ficus-indica*, Cactaceae) in South Africa: Utilization of the naturalized weed, and of the cultivated plants. *Econ. Bot.*, 47(2): 154–156.
- Brutsch, M.O. & Zimmermann, H.G.** 1995. Control and utilization of wild opuntias. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 155–166. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Budinsky, A., Wolfram, R., Oguogho, A., Elthimiou, Y., Stamatopoulos, Y. & Sinsinger, H.** 2001. Regular ingestion of *Opuntia robusta* lowers oxidation injury. *PLEFA*, 55: 45–50.
- Bui Xuan An, Preston, T.R. & Dolberg, F.** 1997. The introduction of low-cost polyethylene tube biogasifiers on small scale farms in Vietnam. *Livest. Res. Rural Dev.*, 9(2) (available at <http://www.lrrd.org/lrrd9/2/an92.htm>). Accessed 7 November 2015.
- Bunch, R.** 1996. Cactus pear products at D'Arigo Bros. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 1: 100–102.
- Butera, D., Tesoriere, L., Di Gaudio, F., Bongiorno, A., Allegra, M., Pintaudi, A.M., Kohen, R. & Livrea, M.A.** 2002. Antioxidant activities of Sicilian prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin. *J. Agric. Food Chem.*, 50: 6895–6901.
- Buxbaum, F.** 1950. *Morphology of cacti*. Pasadena, CA, USA, Abbey Garden Press.
- Buxbaum, F.** 1955. The phylogenetic division of the subfamily ceroideae, cactaceae. *Madrone*, 14(6): 177–206.
- Bwititi, P., Musabayane, C.T. & Nhachi, C.F.B.** 2000. Effects of *Opuntia megacantha* on blood glucose and kidney function in streptozotocin diabetic rats. *J. Ethnopharmacol.*, 69: 247–252.
- Cacciola, S.O. & Magnano di San Lio, G.** 1988. Foot rot of prickly pear cactus caused by *Phytophthora nicotianae*. *Plant Dis.*, 72: 793–796.
- Cai, W., Gu, X. & Tang, J.** 2008. Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*. *Carbohydr. Polym.*, 71(3): 403–410.
- Calderón Paniagua, N., Luna, E., Adolfo, A. & Martínez Hernández, J. de J.** 1997. Efecto de la salinidad en el crecimiento y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). En Memorias Congreso Nacional e Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Mexico, pp. 165–166.
- Callejas, N., Mathus, J. García, A. Martínez, M. & Salas, J.** 2009. Situación actual y perspectiva de mercado para la tuna, el nopalito y derivados en el Estado de México. *Agrociencia*, 43: 73–82.
- Callen, E.O.** 1965. Food habits of some pre-Columbian Mexican Indians. *Econ. Bot.*, 19: 335–343.
- Cañamares, M.V., García Ramos, J.V., Domingo, C. & Sanchez Cortes, S.** 2006. Surface-enhanced Raman scattering study of the anthraquinone red pigment carminic acid. *Vib. Spectrosc.*, 40: 161–167.
- Cantwell, M.** 1995. Post-harvest management of fruits and vegetable stems. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 120–141. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Cantwell, M., Rodríguez Feliz, A. & Robles Contreras, F.** 1992. Postharvest physiology of prickly pear cactus stems. *Sci. Hortic.*, 50: 1–9.

- Caplan, K.** 1990. Marketing strategies for cactus pear and cactus pear leaves for 1990's. In P. Felker, ed. Proceedings of the First Annual Texas Prickly Pear Council, Texas A&M University, Kingsville, Texas, USA.
- Cardador Martínez, A., Jiménez Martínez, C. & Sandoval, G.** 2011. Revalorization of cactus pear (*Opuntia* spp.) wastes as a source of antioxidants. *Cienc. Tecnol. Aliment. (Campinas, Braz.)*, 31(3): 782–788.
- Carpio, M.D.A.** 1952. Nota sobre la cariólogía de dos especies de *Opuntia*. *Genét. Ibér.*, 4: 47–62.
- Caruso, M., Currò, S., Las Casas, G., La Malfa, S. & Gentile A.** 2010. Microsatellite markers help to assess genetic diversity among *Opuntia ficus-indica* cultivated genotypes and their relation with related species. *Plant Syst. Evol.*, 290: 85–95.
- Casas, A. & Barbera, G.** 2002. Mesoamerican domestication and diffusion. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 143–162. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Casp, A. & Abril, J.** 1999. *Procesos de conservación de alimentos*. Madrid, Mundi-Prensa.
- Cassano, A., Conidi, C., Timpone, R., D'Avella, M. & Drioli, E.** 2007. A membrane-based process for the clarification and concentration of cactus pear juice. *J. Food Eng.*, 8: 914–921.
- Cassano, A., Conidi, C., Timpone, R., D'Avella, M. & Drioli, E.** 2010. Physico-chemical parameters of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice clarified by microfiltration and ultrafiltration processes. *Desalination*, 250: 1101–1104.
- Castellanos Santiago, E. & Yahia, E.M.** 2008. Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 Mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.*, 56: 5758–5764.
- Castellar, R., Obon, J., Alacid, M. & Fernández López, J.** 2003. Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. *J. Agric. Food Chem.*, 51: 2772–2776.
- Castellar, M.R., Obon, J.M., Alacid, M. & Fernández López, J.A.** 2008. Fermentation of *Opuntia stricta* (Haw.) fruits for betalains concentration. *J. Agric. Food Chem.*, 56: 4253–4257.
- Caswell, J.** 2000. Analyzing quality and quality assurance (including labeling) for GMOs. *AgBioForum*, 3(4): 225–230
- Cefola, M., Renna, M. & Pace, B.** 2014. Marketability of ready-to-eat cactus pear as affected by temperature and modified atmosphere. *J. Food Sci. Technol.*, 51(1): 25–33.
- CEZA (Agricultural Centre for Arid Zones).** 2011. *Tuna*. University of Chile. 12 pp.
- Chalak, L., Younes, J., Roupahel, S. & Hamadeh, B.** 2012. Morphological characterization of prickly pears (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill.) cultivated in Lebanon. *Int. J. Sci. Res.*, 3(6): 2541–2553.
- Chávez Moreno, C.K., Tecante, A. & Casas, A.** 2009. The *Opuntia* (Cactaceae) and *Dactylopius* (Hemiptera: Dactylopiidae) in Mexico: a historical perspective of use, interaction and distribution. *Biodiversity Conserv.*, 18: 3337–3355.
- Chavez Santoscoy, R.A., Gutierrez Uribe, J.A. & Serna Saldivar, S.O.** 2009. Phenolic composition, antioxidant capacity and in vitro cancer cell cytotoxicity of nine prickly pear (*Opuntia* spp.) juices. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 64: 146–152.
- Chermiti, A.** 1998. Utilisation des figues de Barbarie en remplacement de la mélasse dans les blocs nutritionnels. Effets sur l'ingestion volontaire. *Ann. Zootech.*, 47: 179–184.
- Cheryan, M.** 1998. *Ultrafiltration and microfiltration handbook*. Second edition. Lancaster, USA, CRS Press. 527 pp.
- Chessa, I.** 2010. Cactus pear genetic resources conservation, evaluation and uses. *Cactusnet Newsletter*, 12 [Special issue]: 45–53.
- Chessa, I. & Barbera, G.** 1984. Indagine sulla frigoconservazione dei frutti della cv 'Gialla' di ficodindia. *Frutticoltura*, 46: 57–61.
- Chessa, I. & Nieddu, G.** 1997. Descriptors for Cactus pear (*Opuntia* spp.). *Cactusnet Newsletter*, [Special issue]: 39.
- Chessa, I. & Schirra, M.** 1992. Prickly pear cv 'Gialla': intermittent and constant refrigeration trials. *Acta Hort.*, 296: 129–137.
- Chessa, I., Nieddu, G., Serra, P., Inglese, P. & La Mantia, T.** 1997. Isozyme characterization of *Opuntia* species and varieties from Italian germplasm. *Acta Hort.*, 438: 45–56.
- Chessa, I., Erre, P., Barbato, M., Ochoa, J. & Nieddu, G.** 2013. Polymorphic microsatellite DNA markers in *Opuntia* spp. collections. *Acta Hort.*, 995: 3–50.
- Chinnock, R.J.** 2015. Feral opuntoid cacti in Australia. *J. Adelaide Bot. Gard.*, 3 [Supplement]: 69.
- Chironi, S. & Ingrassia, M.** 2015. Study of the importance of emotional factors connected to the colors of fresh-cut cactus pear fruits in consumer purchase choices for a marketing positioning strategy. Proceedings of the VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hort.*, 1067: 209–216.
- Cho, J.Y., Park, S.C., Kim, T.W., Kim, K.S., Song, J.C., Kim, S.K., Lee, H.M., Sung, H.J., Park, H.J., Song, Y.B., Yoo, E.S., Lee, Ch. & Rhee, M.H.** 2006. Radical scavenging and anti-inflammatory activity of extracts from *Opuntia humifusa* Raf. *J. Pharm. Pharmacol.*, 58: 113–119.
- Chougui, N., Tamendjari, A., Hamiidj, W., Hallal, S., Barras, A., Richard, T. & Larbat, R.** 2013. Oil composition and characteristics of phenolic compounds of *Opuntia ficus-indica* seeds. *Food Chem.*, 139: 796–803.
- Cicala, A., Fabbri, A., Di Grazia, A., Tamburino, A. & Valenti, C.** 1997. Plant shading and flower induction in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Acta Hort.*, 438: 57–64.
- Cissé, M., Vaillant, F., Pallet, D. & Dornier, M.** 2011. Selecting ultrafiltration and nanofiltration membranes to concentrate anthocyanins from roselle extract (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Food Res. Int.*, 44: 2607–2614.
- Claassens, A.S. & Wessels, A.B.** 1997. The fertiliser requirement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) under summer rainfall conditions in South Africa. *Acta Hort.*, 438: 83–95.
- Claps, L.E. & de Haro, M.E.** 2001. Coccoidea (Insecta: Hemiptera) associated with Cactaceae in Argentina. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 4: 77–83.
- Coetzer, G.M. & Fouche, H.J.** 2015. Fruit yield and quality of cactus pear (*Opuntia* spp.) cultivars in the Central Free State, South Africa. *Acta Hort.*, 1067: 89–96.
- Colunga García, M.P., Hernández Xolocotzi, E. & Castillo, A.** 1986. Variación morfológica, manejo agrícola y grados de domesticación de *Opuntia* spp. en El Bajío guanajuatense. *Agrociencia*, 65: 7–49.
- Consoli, S., Inglese, G. & Inglese, P.** 2013. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.)) orchard in a semi-arid environment. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 139: 680–690.
- Corbo, M.R., Altieri, C., D'Amato, D., Campaniello, D., Del Nobile, M.A. & Sinigaglia, M.** 2004. Effect of temperature on shelf-life of lightly processed cactus pear fruit. *Postharvest Biol. Technol.*, 31: 93–104.
- Cordeiro dos Santos, D. & Gonzaga de Albuquerque, S.** 2001. Fodder nopal use in the semi-arid northeast of Brazil. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 37–50. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Coria Cayupán, Y.S., Targa, G., Ochoa, M.J. & Nazareno, M.A.** 2009. Bioactive substance content and antioxidant activity changes during cooled storage of yellow spineless cactus pears. *Acta Hort.*, 811: 131–136.
- Coria Cayupán, Y.S., Ochoa, M.J. & Nazareno, M.A.** 2011. Health-promoting substances and antioxidant properties of *Opuntia* sp. fruits. Changes in bioactive-compound contents during ripening process. *Food Chem.*, 126: 514–519.
- Cornelis, W.M.** 2006. Hydroclimatology of wind erosion in arid and semiarid environments. In *Dryland ecohydrology*, pp. 141–159. Netherlands, Springer.
- Corrales García, J.** 2010. Perspectivas agroindustriales de la postcosecha de nopalito y la tuna. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 5 [Edición Especial]: 1–22.
- Corrales García, J. & Flores Valdez, C.A.** 2003. Tendencias actuales y futuras en el procesamiento del nopal y la tuna. In C.A. Flores Valdez, ed. *Nopalitos y tunas, producción, comercialización, poscosecha e industrialización*, pp. 167–215. Mexico, Autonomous University of Chapingo.
- Corrales García, J., Andrade Rodríguez, J. & Bernabé Cruz, E.** 1997. Response of six cultivars of tuna fruits to cold storage. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 2: 160–168.
- Corrales García, J., Peña Valdivia, C.B., Razo Martínez, Y. & Sánchez Hernández, M.** 2004. Acidity changes and pH-buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biol. Technol.*, 32: 169–174.
- Costa, R.G., Filho, E.M.B., Nunes De Medeiros, A., Givisiez, P.E.N., Queiroga, R.C.R.E. & Melo, A.A.S.** 2009. Effects of increasing levels of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) in the diet of dairy goats and its contribution as a source of water. *Small Ruminant Res.*, 82: 62–65.
- Costa, R.G., Trevino, I.H., De Medeiros, G.R., Medeiros, A.N., Pinto, T.F. & De Oliveira, R.L.** 2012. Effects of replacing corn with cactus pear (*Opuntia ficus indica* Mill) on the performance of Santa Inês lambs. *Small Ruminant Res.*, 102: 13–17.
- Crisosto, C.H. & Valero, D.** 2008. Harvesting and postharvest handling of peaches for the fresh market. In Layne and Bassi, eds. *The peach: Botany, production and uses*, pp. 575–596. CAB International.
- Crosby, A.W.** 1992. *The Columbian exchange. Biological and cultural consequences of 1492*. Turin, Italy, Einaudeditore.
- Curtis, J.R.** 1977. Prickly pear farming in the Santa Clara Valley, California. *Econ. Bot.*, 31: 175–179.
- Da Costa, M. & Huang, B.** 2009. Physiological adaptations of perennial grasses to drought stress. In E. De la Barrera & W. Smith, eds. *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: A tribute to Park S. Nobel*, pp. 169–190. Mexico City, UNAM.

- D'Aquino, S., Agabbio, M., Piga, A., Pilo, G. & Sassu, M.M.** 1996. Influenza di alcuni fungicidi sullo sviluppo dei marciumi in frutti di fico d'India frigoconservati. *Italus Hortus*, 3: 32–37.
- D'Aquino, S., Barberis, A., Continella, A., La Malfa, S., Gentile, A. & Schirra, M.** 2012. Individual and combined effects of postharvest dip treatments with water at 50 °C, soy lecithin and sodium carbonate on cold stored cactus pear fruits. *Commun. Agric. Appl. Biol. Sci. (Univ. Ghent)*, 77: 207–217.
- D'Aquino, S., Chessa, I. & Schirra, M.** 2014. Heat treatment at 38 °C and 75–80% relative humidity ameliorate storability of cactus pear fruit (*Opuntia ficus-indica* cv 'Gialla'). *Food Bioprocess Technol.*, 7: 1066–1077.
- D'Aquino, S., Palma, A., Schirra, M., Continella, A., La Malfa, S. & Gentile, A.** 2015. Decay control of cactus pear by pre- and post-cold storage and water at 50 °C. *Acta Hortic.*, 1067: 119–125.
- Da Silva Vilela, M., De Andrade Ferreira, M., De Azevedo, M., Modesto, E.C., Vasconcelos Guimarães, A. & Bispo, S.V.** 2010. Effect of processing and feeding strategy of the spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* Mill.) for lactating cows: Ingestive behavior. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 125: 1–8.
- De Acosta, J.** 1590. In O. Di Lullo, 1944. *El folklore de Santiago del Estero*, 1: 385. Publicación Oficial. Santiago del Estero.
- De Felice, M.S.** 2004. Prickly pear cactus, *Opuntia* spp. A spine-tingling tale. *Weed Technol.*, 18: 869–877.
- De Haro, M.E. & Claps, L.E.** 1999. Primera cita de *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae) para la República Argentina. *Rev. Soc. Entomol. Argent.*, 58: 128.
- Deidda, P., Nieddu, G. & Spano, D.** 1992. Reproductive behaviour of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. in Sardinia. En *Actas II Congreso Internacional de Tuna y Cochinilla*, 22–25 septiembre 1992, Santiago de Chile, pp. 19–23.
- De Kock, G.C.** 1980. Drought-resistant fodder shrub crops in South Africa. In H.N. Le Houérou, ed. *Browse in Africa: The current state of knowledge*, pp. 399–410. Addis Ababa, International Livestock Centre for Africa.
- De Kock, G.C. & Aucamp, J.D.** 1970. *Spineless cactus. The farmer's provision against drought*, pp. 1–11. Leaflet No. 37. Agricultural Research Institute of the Karoo Region, Dept. Agric. Tech. Services.
- De la Barrera, E. & Nobel, P.S.** 2004. Carbon and water relations for developing fruits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, including effects of drought and gibberellic acid. *J. Exp. Bot.*, 55(397): 719–729.
- De la Cruz, M., Ramírez, F. & Hernández, H.** 1997. DNA isolation and amplification from cacti. *Plant Mol. Biol. Rep.*, 15: 319–325.
- De Léo, M., De Abreu, M.B., Pawlowska, A.M., Cioni, P.L. & Braca, A.** 2010. Profiling the chemical content of *Opuntia ficus-indica* flowers by HPLC-PDA-ESI-MS and GC/EIMS analyses. *Phytochem. Lett.*, 3: 48–52.
- Delgado, A.E. & Sun, D.W.** 2000. Heat and mass transfer for predicting freezing processes, a review. *J. Food Eng.*, 47: 157–174.
- Delgado Sánchez, P., Yáñez Espinosa, L., Jiménez Bremont, J.F., Chapa Vargas, L. & Flores, J.** 2013. Ecophysiological and anatomical mechanisms behind the nurse effect: Which are more important? A multivariate approach for cactus seedlings. *PLoS ONE*, 9(4): e95405.
- De Lotto, G.** 1974. On the status and identity of the cochineal insects (Homoptera: Coccoidea: Dactylopiidae). *J. Entomol. Soc. South. Afr.*, 37: 167–193.
- Del Nobile, M.A., Licciardello, F., Scrocco, C., Muratore, G. & Zappa, M.** 2007. Design of plastic packages for minimally processed fruits. *J. Food Eng.*, 79: 217–224.
- Del Nobile, M.A., Conte, A., Scrocco, C. & Brescia, I.** 2009. New strategies for minimally processed cactus pear packaging. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 10: 356–362.
- Del Valle, V., Hernandez Muñoz, P., Guarda, A. & Galotto, M.J.** 2005. Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus-indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chem.*, 91: 751–756.
- De Lyra, M.C.C.P., Santos, D.C., Mondragón Jacobo, C., da Silva, M.L.R.B., Mergulhão, A.C.E.S. & Martínez Romero, E.** 2013a. Isolation and molecular characterization of endophytic bacteria associated with the culture of forage cactus (*Opuntia* spp.). *J. Appl. Biol. Biotechnol.*, 1(01): 006–010.
- De Lyra, M.C.C.P., Santos, D.C., Da Silva, M.L.R.B., Martínez Romero, E. & Mondragón Jacobo, C.** 2013b. Molecular characteristics of *Opuntias* based on internal transcribed spacer sequences (ITS) of Queretaro State – Mexico. *Acta Hortic.* 995: 99–108.
- De Micco, V. & Aronne, G.** 2012. Morpho-anatomical traits for plant adaptation to drought: plant responses to drought stress. In R. Aroca, ed. *Plant responses to drought stress from morphological to molecular features*, pp. 37–61. 461 pp.
- De Waal, H.O., Schwalbach, L.M.J., Combrinck, W.J., Shiningavame, K.L. & Els, J.** 2013a. Commercialisation of sun-dried cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) cladodes in feedlot diets for Dorper Wether lambs. *Acta Hortic.*, 995: 343–350.
- De Waal, H.O., Fouché, H., de Wit, M., Zimmermann, H.G. & Louhaichi, M.** 2013b. *Cactus pear in South Africa: History, challenges, and potential* (available at <http://www.icaarda.org/sites/default/files/Cactus-Pear-in-South-Africa-new-%281%29.pdf>).
- De Waal, H.O., Jouhaichi, M., Taguchi, M., Fouché, H. & de Wit, M., eds.** 2015. Development of a cactus pear agro-industry for the sub-Saharan Africa region. *Cactusnet Newsletter*, 14 [Special Issue]. 94 pp.
- De Wit, M., Nel, P., Osthoff, G. & Labuschagne, M.T.** 2010. The effect of variety and location on cactus pear fruit quality. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 65(2): 136–145.
- De Wit, M., Bothma, C., Swart, P., Frey, M. & Hugo, A.** 2014. Thermal treatment, jelly processing and sensory evaluation of cactus pear fruit juice. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 16: 1–14.
- Díaz, M.I.** 2003. Rescate del colonche y elaboración de vino de tuna. En *Memorias IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*, 2–6 September, Zacatecas, Mexico, pp. 256–259.
- Díaz, F., Santos, E.M., Filardo, S., Villagómez, R. & Scheinvar, L.** 2006. Colorant extraction from a red prickly pear (*Opuntia lasiacantha*) for food application. *Electron. J. Environ., Agric. Food Chem.*, 5: 1330–1337.
- Díaz del Castillo, B.** 1991. *Historia verdadera de la conquista de la Nueva España* (ca. 1568), pp. 109–117. TEA.
- Díaz Franco, A. & Maya Hernandez, V.** 2014. *Producción de nopal de verdura de invierno en microtuneles en Tamauilipas*. Despliegue para productores. Mexico, INIFAP, CIRNO.
- Díaz Medina, E.M., Rodríguez Rodríguez, E.M. & Díaz Romero, C.** 2007. Chemical characterization of *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus-indica* fruits. *Food Chem.*, 103: 38–45.
- Diguet, L.** 1928. *Les cactacées utiles du Mexique*. Archives d'Histoire Naturelles, Soc. Nat. D'Acclimatation de France, Paris. 552 pp.
- Di Lullo, O.** 1944. *El folklore de Santiago del Estero*. Publicación Oficial, Santiago del Estero.
- Dimitris, L., Pompodakis, N., Markellou, E. & Lionakis, S.M.** 2005. Storage response of cactus pear fruit following hot water brushing. *Postharvest Biol. Technol.*, 38: 145–151.
- Dodd, A.P.** 1940. *The biological campaign against prickly pear*. Commonwealth Prickly Pear Board Bulletin. Brisbane, Australia, Government Printer. 177 pp.
- D'Oodorico, P. & Porporato, A.** 2006. Ecohydrology of arid and semiarid ecosystems, an introduction. In *Dryland ecohydrology*, pp. 1–10. Netherlands, Springer.
- Dok Go, H., Lee, K.H., Kim, H.J., Lee, E.H., Lee, J., Song, Y.S., Lee, Y.H., Jin, C. Lee, Y.S. & Cho, J.** 2003. Neuroprotective effects of antioxidative flavonoids, quercetin, (+)-dihydroquercetin and quercetin 3-methyl ether, isolated from *Opuntia ficus-indica* var. saboten. *Brain Res.*, 965(13): 130–136.
- Domingues, O.** 1963. *Origem e introdução da palma forrageira no Nordeste*. Recife, Brazil, Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais.
- Donkin, R.A.** 1977. Spanish red: An ethnographic study of cochineal and the *Opuntia* cactus. *Trans. Am. Philos. Soc.*, 67(5): 1–77.
- Doran, J.W.** 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 88: 119–127.
- Doria, G.** 1992. Piante en animali protogonisti dell'integrazione atlantica. In L. Capocaccia Orsini & G. Doria, *Animali e piante dall'America all'Europa*. Genova, Italy, SAGEP.
- Drennan, P.M.** 2009. Temperature influences on plant species of arid and semi-arid regions with emphasis on CAM succulents. In E. De la Barrera & W. Smith, eds. *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: A tribute to Park S. Nobel*, pp. 57–94. Mexico City, UNAM.
- Drennan, P.M. & Nobel, P.S.** 1998. Root growth dependence on soil temperature for *Opuntia ficus-indica*: influences of air temperature and a doubled CO₂ concentration. *Funct. Ecol.*, 12: 959–964.
- Drennan, P.M. & Nobel, P.S.** 2000. Responses of CAM species to increasing atmospheric CO₂ concentrations. *Plant, Cell Env.*, 23: 767–781.
- Dubeux Jr, J.C.B. & Santos, M.V.F.** 2005. dos. Exigências nutricionais da palma forrageira. In R.S.C. Menezes, D.A. Simões & E.V.S.B. Sampaio, eds. *A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso*, pp. 105–128. Recife, Brazil, Editora Universitária UFPE.
- Dubeux, Jr, J.C.B., Santos, M.V.F. dos, Lira, M.A., Santos, D.C. dos, Farias, I., Lima, L.E. & Ferreira, R.L.C.** 2006. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in north-east Brazil. *J. Arid Environ.*, 67: 357–372.

- Dubeux Jr, J.C.B., Saraiva, F.M., Santos, D.J.C. dos., Lira, M.A., Santos, M.V.F. dos. & Silva, N.G. de M. 2011a. *Exigências nutricionais e adubação da palma forrageira*. 2º Congresso Brasileiro de Palma e Outras Cactáceas, Garanhuns, PE.
- Dubeux Jr, J.C.B., Muir, J.P., Santos, M.V.F., Vendramini, J.M.B., Mello, A.C.L. & Lira, M.A. 2011b. Improving grassland productivity in the face of economic, social, and environmental challenges. *Braz. J. Anim. Sci.*, 40: 280–290.
- Dubeux Jr, J.C.B., dos Santos, M.V.F., Cavalcante, M. & dos Santos, D.C. 2013. *Potencial da palma forrageira na América do sul* Proceedings of the Second Meeting for the Integral Use of Cactus Pear and Other Cacti and First South American Meeting of FAO–ICARDA CactusNet, 12–19 September 2012, Santiago del Estero, Argentina. 175 pp.
- Dubeux Jr, J.C.B., dos Santos, D.C., Lira, M. de A., dos Santos, M.V.F., Lima, G.F. da C., de Mello, A.C.L., Ferreira, M. de A. & da Cunha, M.V. 2015a. Global use of cactus as livestock feed. In H.O. De Waal, M. Louhaichi, M. Taguchi, H.J. Fouche & M. de Wit, eds. *Development of cactus pear agroindustry for the sub-Saharan African Region*. Proceedings of the International Workshop, 27–28 January 2015, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa. 96 pp.
- Dubeux Jr, J.C.B., dos Santos, M.V.F., De Mello, A.C.L., Da Cunha, M.V., Ferreira, M. De A., Dos Santos, D.C., Lira, M. De A. & Silva, M. Da C. 2015b. Forage potential of cacti on drylands. *Acta Hortic.*, 1067: 181–186.
- Dubrovsky, J.G., North, G.B. & Nobel, P.S. 1998. Root growth, developmental changes in the apex, and hydraulic conductivity for *Opuntia ficus-indica* during drought. *New Phytol.*, 138: 75–82.
- Duru, B. & Turker, N. 2005. Changes in physical properties and chemical composition of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) during maturation. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 7: 22–33.
- Eames, A.J. 1961. *Morphology of the angiosperms*. 518 pp.
- Einkamerer, O.B. 2008. *Animal performance and utilization of Opuntia-based diets by sheep*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc dissertation).
- Einkamerer, O.B., De Waal, H.O., Combrinck, W.J. & Fair, M.D. 2009. Feed utilization and growth of Dorper wethers on *Opuntia*-based diets. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 39 [Supplement 1]: 53–57.
- Enigbocan, M.A., Felder, T.B., Thompson, J.O., Kuti, J.O. & Ekpenyong, K.I. 1996. Hypoglycaemic effects of *Opuntia ficus-indica* Mill., *Opuntia lindheimeri* Engelm. and *Opuntia robusta* Wendl. in streptozotocin-induced diabetic rats. *Phytother. Res.*, 10: 379–382.
- Ennouri, M., Evelyne, B., Laurence, M. & Hamadi, A. 2005. Fatty acid composition and rheological behaviour of prickly pear seed oils. *Food Chem.*, 93: 431–437.
- Ennouri, M., Fetoui, H., Bourret, E., Zeghal, N., Guermazi, F. & Hamadi, A. 2006a. Evaluation of some biological parameters of *Opuntia ficus-indica*. 1. Influence of a seed oil supplemented diet on rats. *Bioresour. Technol.*, 97: 1382–1386.
- Ennouri, M., Fetoui, H., Bourret, E., Zeghal, N., Guermazi, F. & Hamadi, A. 2006b. Evaluation of some biological parameters of *Opuntia ficus-indica*. 2. Influence of seed supplemented diet on rats. *Bioresour. Technol.*, 97: 2136–2140.
- Ennouri, M., Fetoui, H., Hammami, M., Bourret, E., Hamadi, A. & Zeghal, N. 2007. Effects of diet supplementation with cactus pear seeds and oil on serum and liver lipid parameters in rats. *Food Chem.*, 101: 248–253.
- Erre, P. & Chessa, I. 2013. Discriminant analysis of morphological descriptors to differentiate the *Opuntia* genotypes. *Acta Hortic.*, 995: 43–50.
- Erre, P., Nieddu, G. & Chessa, I. 2013. Polymorphic microsatellite DNA markers in *Opuntia* spp. collections. *Acta Hortic.*, 995: 35–41.
- Erre, P., Chessa, I., Nieddu, G. & Jones, P.G. 2011. Diversity and spatial distribution of *Opuntia* spp. in the Mediterranean Basin. *J. Arid Environm.*, 73: 1058–1066.
- Escalante, M.A. 2013. Producción intensiva de grana cochinilla en Morelos, México. In L. Portillo & A.L. Viguera, eds. *Conocimiento y aprovechamiento de la grana cochinilla*, pp. 155–162. First edition. Mexico, University of Guadalajara.
- Esparza, J. 2014. *Valoración de atributos de calidad de la tuna (Opuntia ficus-indica (L.) en fresco y mínimamente procesada y determinación de segmentos de mercado en residentes de la comuna de la Florida, Región Metropolitana*. University of Chile (thesis). 75 pp.
- Esparza, G., Esparza, F.J., Macias, E. & Mendez, G. 2006. Effect of ethephon on ripening of cactus pear fruits. *Acta Hortic.*, 728: 165–171.
- Faedda, R., Pane, A., Cacciola, S.O., Granata, G., Salafia, L. & Sinatra, F. 2015a. *Penicillium polonicum* causing a postharvest soft rot of cactus pear fruits. *Acta Hortic.*, 1067: 193–197.
- Faedda, R., Granata, G., Pane, A., Cacciola, S.O., D'Aquino, S., Palma, A., Sanzani, S.M. & Schena, L. 2015b. Postharvest fungal diseases of cactus pear fruits in southern Italy. *Acta Hortic.*, 1067: 193–197.
- FAO. 2011. *Manual de biogás*. FAO Regional Office for Latin America and the Caribbean, Santiago.
- Farias, I., Lira, M. de A., Santos, D.C. dos, Fernandes, A.P.M., Tavares Filho, J.J. & Santos, M.V.F. dos. 1989. Efeito de frequência e intensidade de cortes em diferentes espaçamentos na cultura da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*, Mill), em consórcio com sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Pesqui. Agropecu. Pernambuco, Recife*, 6 [especial]: 169–183.
- Farias, I., Lira, M. de A., Santos, D.C. dos, Tavares Filho, J.J., Santos, M.V.F. dos & Fernandes, A.P.M. 2000. Manejo de colheita e espaçamento da palma forrageira, em consórcio com sorgo granífero, no Agreste de Pernambuco. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 35(2): 341–347.
- Farias, I., Santos, D.C. dos & Dubeux Jr, J.C.B. 2005. Estabelecimento e manejo da palma forrageira. In R.S.C. Menezes, D.A. Simões & E.V.S.B. Sampaio, eds. *A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso*, pp. 81–104. Recife, Brazil, Editora Universitária da UFPE.
- Faust, M. 1989. *Physiology of temperate zone fruit trees*. New York, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- Fehlberg, S.D., Allen, J.M. & Church, K. 2013. A novel method of genomic DNA extraction for Cactaceae. *Appl. Plant Sci.*, Mar. 1(3).
- Felker, P. 1995. Forage and fodder production and utilization. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 144–154. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Felker, P. & Bunch, R.A. 2009. Mineral nutrition of cactus for forage and fruits. *Acta Hortic.*, 811: 389–394.
- Felker, P. & Guevara, J.C. 2001. An economic analysis of dryland fruit production of *Opuntia ficus-indica* in Santiago del Estero, Argentina. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 20–30.
- Felker, P. & Inglese, P. 2003. Short-term and long-term research needs for *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. utilization in arid areas. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 5: 131–151.
- Felker, P. & Russel, C. 1988. Effects of herbicides and cultivation on the growth of *Opuntia* in plantations. *J. Hortic. Sci.*, 63: 149–155.
- Felker, P., Rodríguez, S. del C., Casoliba, R.M., Filippini, R., Medina, D. & Zapata, R. 2005. Comparison of *Opuntia ficus-indica* cultivars of Mexican and Argentine origin for fruit yield and quality in Argentina. *J. Arid Environ.*, 60: 405–422.
- Felker, P., Paterson, A. & Jenderek, M.M. 2006. Forage potential of *Opuntia* clones maintained by the USDA, National Plant Germplasm System (NPGS) collection. *Crop Sci.*, 46: 2161–2168.
- Felker, P., Bunch, R., Russo, G. & Tani, J.A. 2010. *Progreso en la identificación del agente causal de Engrosamiento del cladodio o macho*. *Rev. Salud Publica Nutr.*, [Edición Especial]: 5.
- Fernández, M.M.R., Vázquez R., J. & Villalobos, J.A. 1990. Fertilización preliminar de nopal verdura en Milpa Alta, D.F. En Memorias del IV Reunión Nacional y II Congreso Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. SOMECH, A.C., INCA-Rural–CECCAM. Zacatecas, Mexico. 29 pp.
- Fernández, M., Lin, E.C.K., Trejo, A. & McNamara, D.J. 1994. Prickly pear (*Opuntia* sp.) pectin alters hepatic cholesterol metabolism without affecting cholesterol absorption in Guinea pigs fed a hypercholesterolemic diet. *J. Nutr.*, 124: 817–824.
- Fernández López, J., Almela, L, Obón, J.M. & Castellar, R. 2010. Determination of antioxidant constituents in cactus pear fruits. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 65: 253–259.
- Fester, G.A. 1941. Colorantes de insectos. *An. Soc. Cient. Argent.*, 131: 100–103.
- Fester, G.A. & Lexow, S. 1943. Colorantes de insectos (2ª comunicación). *An. Soc. Cient. Argent.*, 135: 89–96.
- Feugang, J.M., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F.C. & Zou, C. 2006. Nutritional and medicinal use of cactus (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Front. Biosci.*, 11: 2574–2589.
- Feugang, J.M., Ye, F., Zhang, D.Y., Yu, Y., Zhong, M., Zhang, S. & Zou, C. 2010. Cactus pear extracts induce reactive oxygen species production and apoptosis in ovarian cancer cells. *Nutr. Cancer*, 62: 692–699.
- FIA (Foundation for Agrarian Innovation). 2010. *Estudio de la cadena productiva de la tuna*. Study commissioned to the University of Chile by FAI, Ministry of Agriculture Chile. 165 pp.
- Fierro A., A., González L., M.M., Rodríguez A., F., Olivares O., J., Zavaleta B., P., Montiel S., D., Martínez P., M.A. & Soto O., D.M. 2003. Evapotranspiración del nopal verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) var. Milpa Alta, en el sur del D.F. En Memoria del IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Zacatecas, pp. 180–182.

- Figueiredo, E. & Smith, G.F.** 2008. *Plants of Angola*. Strelitzia 22. Pretoria, SANBI. 279 pp.
- El Finti, A., Belayadi, M., Boullania, R.E., Msanda, F., Serghini, M.A. & Mousadiq, A.E.** 2013. Genetic structure of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in Moroccan collection. *Asian J. Plant Sci.*, 12: 145–148.
- Flores, A.** 1992. Producción de vino y aguardiente de tuna, alternativa en el aprovechamiento del nopal. *Cienc. Desarrollo*, 17: 56–68.
- Flores, V.I.** 1995. Crianza de la cochinilla en Sudamérica. En Memorias del Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 6° Congreso Nacional y 4° Internacional. Universidad de Guadalajara, Jalisco, Mexico, pp. 48–55.
- Flores B., S.** 2013. *Fertilización y frecuencia de riego en la producción de nopal verdura (Opuntia ficus-indica L.) en túnel de plástico*. Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad, Fruticultura. Montecillo, Texcoco, Edo. de México (MSc thesis). 66 pp (available at http://www.biblio.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/10521/20071/Flores_Barrera_S_MC_Fruticultura_2013.pdf).
- Flores Flores, V. & Tekelenburg, A.** 1995. Dacti (*Dactylopius coccus* Costa) dye production. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 167–185. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Flores Flores, R., Velazquez del Valle, M.G., León Rodríguez, R., Flores Moctezuma, H.E. & Hernández Lauzardo, A.N.** 2013. Identification of fungal species associated with cladode spot of prickly pear and their sensitivity to chitosan. *J. Phytopathol.*, 161: 544–552.
- Flores Hernández, A., Orona C., I., Martínez M., J.M., Rivera G., M. & Hernández M., J.G.** 2004. Productividad del nopal para verdura (*Opuntia* spp) bajo riego por goteo subterráneo en la Comarca Lagunera. *Rev. Chapingo Ser. Zonas Áridas*, 3: 99–104.
- Flores Hernandez, A., Murillo Amador, B., Rueda Puente, E., Salazar Torres, J., García Hernandez, J.L. & Troyo Dieguez, E.** 2006. Reproducción de cochinilla silvestre *Dactylopius opuntiae* (Homoptera: Dactylopiidae). *Rev. Mex. Biodivers.*, 77: 97–102.
- Flores Valdez, C.A.** 1995. *Nopalitos* production, processing and marketing. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 92–99. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Flores Valdez, C.A.** 2003. Producción y comercialización de la tuna. In J. Corrales García & C.A. Flores Valdez, eds. *Nopalitos y tuna producción, comercialización postcosecha e industrialización*, pp. 57–58.
- Fontaine, C., Guimarães, P.R., Jr, Kéfi, S., Loeuille, N., Memmott, J., van der Putten, W.H., van Veen F.J.F. & Thébaud, E.** 2011. The ecological and evolutionary implications of merging different types of networks. *Ecol. Lett.*, 14: 1170–1181.
- Foxcroft, L.C. & Hoffmann, J.H.** 2000. Dispersal of *Dactylopius opuntiae* Cockerell (Homoptera: Dactylopiidae), a biological control agent of *Opuntia stricta* (Haworth.) Haworth. (Cactaceae) in the Kruger National Park. *Koedoe*, 43(2): 1–5.
- Franck, N.** 2006. Alternativas para la producción de bioenergía en las zonas áridas y semiáridas de Chile. In E. Acevedo, ed. *Agroenergía, un desafío para Chile*, pp.137–148. Serie Ciencias Agronómicas No. 11. Santiago, Chile, University of Chile. 176 pp.
- Franck, N.** 2010. *Perspectivas de la tecnificación del cultivo de la tuna*. Instituto de investigaciones agropecuarias, centro de investigación especializado en agricultura del desierto y altiplano, INIA Ururi, Región de Arica y Parinacota. Ministerio de Agricultura de Chile. Informativo 21, Mayo.
- Franco, A. & Ponte, J.J.** 1980. A podridão polianca da palma forrageira. *Fitopatol. Bras.*, 5: 277–282.
- Frati Munari, A.C., Xilotl Diaz, N., Altamirano, P., Ariza, R. & Lopez Ledesma, R.** 1991. The effect of two sequential doses of *Opuntia streptacantha* upon glycaemia. *Arch. Invest. Med. Mexico*, 22: 333–336.
- Frati Munari, A.C., Vera Lastra, O. & Ariza Andraca, C.R.** 1992. Evaluation of nopal capsules in diabetes mellitus. *Gac. Med. Mex.*, 128: 431–436.
- Frati Munari, A.C., Fernández Harp, J.A., de la Riva, H., Ariza Andraca, R. & del Carmeitorres, M.** 2004. Effect of nopal (*Opuntia* sp.) on serum lipids, glycaemia and body weight. *Am. J. Clin. Nutr.*, 80: 668–673.
- Freeman, T.P.** 1969. The developmental anatomy of *Opuntia basilaris*. I. Embryo, root, and transition zone. *Am. J. Bot.*, 56: 1067–1074.
- Freeman, T.** 1970. The developmental anatomy of *Opuntia basilaris*. II. Apical meristem, leaves, areoles, glochids. *Am. J. Bot.*, 57(6): 616–622.
- Fucikovsky Zak, L., Yáñez Morales, M. de Jesús, Alanis Martínez, I. & González Pérez, E.** 2011. New hosts of 16SrI phytoplasma group associated with edible *Opuntia ficus-indica* crop and its pests in Mexico. *Afr. J. Microbiol. Res.*, 5: 910–918.
- Galati, E.M., Monforte, M.T., Tripodo, M.M., d'Aquino, A. & Mondello, M.R.** 2001. Antitumor activity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae): ultrastructural study. *J. Ethnopharmacol.*, 76: 1–9.
- Galati, E.M., Pergolizzi, S., Miceli, N., Monforte, M.T. & Tripodo M.M.** 2002. Study on the increment of the production of gastric mucus in rats treated with *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cladodes. *J. Ethnopharmacol.*, 83: 229–233.
- Galati, E.M., Mondello, M.R., Giuffrida, D., Dugo, G., Miceli, N., Pergolizzi, S. & Taviano, M.F.** 2003a. Chemical characterization and biological effects of Sicilian *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Fruit juice: Antioxidant and antiulcerogenic activity. *J. Agric. Food Chem.*, 51: 4903–4908.
- Galati, E.M., Tripodo, M.M., Trovato, A., d'Aquino, A. & Monforte, M.T.** 2003b. Biological activity of *Opuntia ficus-indica* cladodes II: Effect on experimental hypercholesterolemia in rats. *Pharm. Biol.*, 41: 175–179.
- Galati, E.M., Mondello, M.R., Lauriano, E.R., Taviano, M.F., Galluzzo, M. & Miceli, N.** 2005. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Fruit juice protects liver from carbon tetrachloride induced injury. *Phytother. Res.*, 19: 796–800.
- Gallegos Vázquez, C. & Mondragón Jacobo, C.** 2009. An update on the evolution of the cactus pear industry in Mexico. *Acta Hort.*, 811: 69–76.
- Gallegos Vázquez, C. & Mondragón Jacobo, C.** 2011. *Cultivares selectos de tuna, de México al Mundo*. Chapingo, Mexico, Autonomous University of Chapingo, SNICS–SAGARPA. 159 pp.
- Gallegos Vázquez, C., Cervantes Herrera, J. & Barrientos Priego, A.F.** 2005. *Manual gráfico para la descripción varietal del nopal tunero y xoconostle (Opuntia spp.)*. Chapingo, Mexico, Autonomous University of Chapingo, SNICS–SAGARPA. 116 pp.
- Gallegos Vazquez, C., Cervantes Herrera, J., Reyes Agüero, J.A., Fernandez Montes, R., Mondragón Jacobo, C., Luna, J.V., Martínez Gonzalez, J.C. & Rodriguez, S.** 2006. Inventory of the main commercial cactus pear (*Opuntia* spp.) cultivars in Mexico. *Acta Hort.*, 728: 17–28.
- Gallegos Vazquez, C., Mondragón Jacobo, C. & Reyes Agüero, J.A.** 2009. An update on the evolution of the cactus pear industry in Mexico. *Acta Hort.*, 811: 69–76.
- Gallegos Vazquez, C., Mendez Gallegos, S. de J. & Mondragón Jacobo, C.** 2013. *Producción sustentable de la tuna en San Luis Potosí*. San Luis Potosí, Mexico, Colegio de Postgraduados–Fundación San Luis Potosí Produce.
- Galizzi, F.A., Felker, P., Gonzalez, C. & Gardiner, D.** 2004. Correlations between soil and cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality in cactus pears, *Opuntia ficus-indica* in a traditional farm setting in Argentina. *J. Arid Environ.*, 59: 115–132.
- Gandía Herrero, F., Jiménez Atienzar, M., Cabanes, J., García Carmona, F. & Escribano, J.** 2010. Stabilization of the bioactive pigment of *Opuntia* fruits through maltodextrin encapsulation. *J. Agric. Food Chem.*, 58: 10646–10652.
- Ganopoulos, I., Kalivas, A., Kavroulakis, N., Xanthopoulou, A., Mastrogianni, A., Koubouris, G. & Madesis, P.** 2015. Genetic diversity of barbary fig (*Opuntia ficus-indica*) collection in Greece with ISSR molecular markers. *Plant Gene*, 2: 29–33.
- García, J., Hernández, I., Tarango, L., Torres, M., Becerra, J., Pastor, F., Martínez, O., Valverde, A., García, J., Espinoza, A., Cedillo, I., Amente, A., Rössel, D. & Tiscareño, A.** 2003 *Programa Estratégico de Necesidades de Investigación y Transferencia de Tecnología en el Estado de San Luis Potosí Etapa II Caracterización de la cadena agroalimentaria del nopal tunero e identificación de sus demandas tecnológicas*. San Luis Potosí, Mexico, Colegio de postgraduados Campus San Luis Potosí Fundación Produce.
- García de Cortázar, V. & Nobel, P.S.** 1990. Worldwide productivity indices and yield predictions for a CAM plant, *Opuntia ficus-indica*, including effects of doubled CO₂ levels. *Agric. For. Meteorol.*, 49: 261–279.
- García de Cortázar, V. & Nobel, P.S.** 1991. Prediction and measurement of high annual productivity for *Opuntia ficus-indica*. *Agric. For. Meteorol.*, 56: 261–272.
- García de Cortázar, V. & Nobel, P.S.** 1992. Biomass and fruit production for the prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica*. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 117: 558–562.
- García de Cortázar, V. & Varnero, M.T.** 1995. Energy production. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 186–191. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- García Gil, F., Lanz Mendoza, H. & Hernández Hernández, F.C.** 2007. Free radical generation during the activation of hemolymph prepared from the homopteran *Dactylopius coccus*. *Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 65: 20–28.
- García Moya, E., Romero Manzanares, A. & Nobel, P.S.** 2010. Highlights for *Agave* productivity. *GCB Bioenergy*, 3: 4–14.
- García Zambrano, E.A., Salinas, G., Vazquez, R., Cardenas, E. & Gutierrez A.** 2006. Clasificación y estimación de la diversidad genética de Nopal *Opuntia* spp. en base a descriptores fenotípicos y marcadores genéticos moleculares. *Phyton*, 75: 125–135.

- García Zambrano, E.A., Zavala García, F., Gutiérrez Diez, A., Ojeda Zacarias, M.C. & Cerda Hurtado, I. 2009. Estimation of the genetic diversity of *Opuntia* spp. using molecular markers AFLP. *Phyton*, 78: 117–120.
- Gareca, E. 1993. *Experiencias del PERTT en tuna-cochinilla*. En *Memorias del III Seminario Regional de Tuna y Cochinilla*. Tarija, Bolivia, pp. 36–37.
- Gathaara, G.N., Felker, P. & Land, M. 1989. Influence of nitrogen and phosphorus on *Opuntia engelmannii* tissue N and P concentrations, biomass production and fruit yields. *J. Arid Environ.*, 16: 337–346.
- Gebremariam, T., Melaku, S. & Alemu Yami, A. 2006. Effect of different levels of cactus (*Opuntia ficus-indica*) inclusion on feed intake, digestibility and body weight gain in tef (*Eragrostis tef*) straw-based feeding of sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 131: 41–52.
- Gersani, M., Graham, A.E. & Nobel, P.S. 1993. Growth responses of individual roots of *Opuntia ficus-indica* to salinity. *Plant, Cell Env.*, 16: 827–834.
- Gharby, S., Harhar, H., Charrouf, Z., Bouzobaa, Z., Boujghagh, M. & Zine, S. 2015. Physicochemical composition and oxidative stability of *Opuntia ficus-indica* seed oil from Morocco. *Acta Hort.*, 1067: 83–88.
- El Gharras, H., Hasib, A., Jaouad, A. & El Bouadili, A. 2006. Caracterización química y física de tres variedades de higos chumbos amarillos de Marruecos (*Opuntia ficus-indica*) en tres etapas de madurez. *Cienc. Tecnol. Aliment.*, 5(2): 93–99.
- Ghazi, Z., Ramdani, M., Fauconnier, M.L., El Mahi, B. & Cheikh, R. 2013. Fatty acids sterols and vitamin E composition of seed oil of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia Dillenii* from Morocco. *J. Mater. Environ. Sci.*, 4(6): 967–972.
- Gibson, A.C. 1976. Vascular organization in shoots of Cactaceae. 1. Development and morphology of primary vasculature in *Pereksioideae* and *Opuntioideae*. *Am. J. Bot.*, 63: 414–426.
- Gibson, A.C. 1977. Wood anatomy of opuntias with cylindrical to globular stems. *Bot. Gaz.*, 138: 334–351.
- Gibson, A.C. 1978a. Structure of *Pterocactus tuberosus*, a cactus geophyte. *Cact. Succ. J.*, 50: 41–43.
- Gibson, A.C. 1978b. Wood anatomy of platy-opuntias. *Aliso*, 9: 279–307.
- Gibson, A.C. & Horak, K.E. 1978. Systematic anatomy and phylogeny of Mexican columnar cacti. *Ann. Mo. Bot. Gard.*, 65: 999–1057.
- Gibson, A.C. & Nobel, P.S. 1986. *The cactus primer*. Cambridge, MA, USA, Harvard University Press.
- Gil, S.G. & Espinoza, R.A. 1980. Fruit development in the prickly pear with pre-anthesis application of gibberellin and auxin. *Cienc. Invest. Agrar.*, 7(2): 141–147.
- Gilson, A. 1999. A prickly passion. *SA Country Life*, 90–92.
- Githure, C.W., Zimmermann, H.G. & Hoffmann, J.H. 1999. Host specificity of biotypes of *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (Hemiptera: Dactylopiidae): prospects for biological control of *Opuntia stricta* (Haworth) Haworth (Cactaceae) in Africa. *Afr. Entomol.*, 7(1): 43–48.
- Gittens, C. 1993. Prickly pears can be a thorny problem. *Farmers Weekly*, 5 Feb.: 30–31.
- Given, D.R. 1994. *Principles and practice of plant conservation*. Portland, OR, USA, Timber Press.
- Goidanich, G. 1964. *Manuale di patologia vegetale*. Vol. II. Bologna, Italy, Edizioni Agricole.
- Goldstein, G., Andrade, J.L. & Nobel, P.S. 1991. Differences in water relations parameters for the chlorenchyma and parenchyma of *Opuntia ficus-indica* under wet versus dry conditions. *Aust. J. Plant Physiol.*, 18: 95–107.
- Gómez, H. 2013. *Estabilidad de betalainas en una bebida refrescante adicionada de microparticulas de pulpa de tuna púrpura, extracto ultrafiltrado y nanofiltrado*. Santiago, Faculty of Agronomic Sciences, University of Chile (Masters thesis).
- Gomez Casanovas, N., Blanc Betes, E., Gonzalez Meler, M.A. & Azcon Bieto, J. 2007. Changes in respiratory mitochondrial machinery and cytochrome and alternative pathway activities in response to energy demand underlie the acclimation of respiration to elevated CO₂ in the invasive *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.*, 145(1): 49–61.
- Gonzalez, C.L. 1989. Potential of fertilization to improve nutritive value of prickly pear cactus (*Opuntia lindheimerii* Engelm.). *J. Arid Environ.*, 16: 87–94.
- González, E.A., García, E.M. & Nazareno, M.A. 2009. Free radical scavenging capacity and antioxidant activity of cochineal (*Dactylopius coccus* C.) extracts. *Food Chem.*, 119: 358–362.
- Gorini, F., Testoni, A., Cazzola, R., Lovati, F., Bianco, M.G., Chessa, I., Schirra, M., Budroni, M. & Barbera, G. 1993. Aspetti tecnologici: Conservazione e qualità di fico d'India e avocado. *Inf. Agrar.*, 44: 89–92.
- Granata, G. 1995. Biotic and abiotic diseases. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 109–119. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Granata, G. & Sidoti, A. 1997. Appearance of Alternaria golden spot on cactus pear in Italy. *Acta Hort.*, 438: 129–130.
- Granata, G. & Sidoti, A. 2002. Survey of diseases discovered on *Opuntia ficus-indica* in producer countries. *Acta Hort.*, 581: 231–237.
- Granata, G. & Varvaro, L. 1990. Bacterial spots and necrosis caused by yeasts on prickly pear cactus in Sicily. In Proceedings of the 8th Congress of the Mediterranean Phytopathology Union, 28 October – 3 November, Agadir, Morocco, pp. 467–468.
- Granata, G., Paltrinieri, S., Botti, S. & Bertaccini, A. 2006. Aetiology of *Opuntia ficus-indica* malformations and stunting disease. *Ann. Appl. Biol.*, 149: 317–325.
- Grant, V. & Grant, K.A. 1982. Natural pentaploids in the *Opuntia linheimeri-phaeacantha* group in Texas. *Bot. Gaz.*, 143: 117–120.
- Griffith, M.P. 2003. Using molecular data to elucidate reticulate evolution in *Opuntia* (Cactaceae). *Madroño*, 50: 162–169.
- Griffith, M.P. 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *Am. J. Bot.*, 91(11): 1915–1921.
- Griffith, M.P. & Porter, M. 2003. Back to the basics: A simple method of DNA extraction for mucilaginous cacti. *Bradleya*, 21: 126–128.
- Griffith, M.P. & Porter, M. 2009. Phylogeny of *Opuntioideae* (Cactaceae). *Int. J. Plant Sci.*, 170(1): 107–116.
- Griffiths, D. 1908. Illustrated studies in the genus *Opuntia* L. Rep. *Ann. Mo. Bot. Gard.*, 19: 259–272.
- Griffiths, D. 1909. *The "spineless" prickly pears*. USDA Bulletin No. 140. Washington, DC, Government Printing Office. 22 pp.
- Griffiths, D. 1912. The thornless prickly pears. *Farmers' Bull. USDA*, 483: 1–20.
- Griffiths, D. 1914. Reversion in prickly pears. *J. Heredity*, 5: 222–225.
- Griffiths, D. 1915. *Yields of native prickly pear in Southern Texas*. USDA Bulletin No. 208. Washington, DC, Government Printing Office. 11 pp.
- Griffiths, D. 1933. *Les cactus fourrage pour le bétail*. Bulletin de la Direction Générale de l'Agriculture du Commerce et de la Colonisation de Tunisie, pp. 313–338.
- Griffiths, H., Cousins, A.B., Badger, M.R. & von Caemmerer, S. 2007. Discrimination in the dark: resolving the interplay between metabolic and physical constraints to phosphoenolpyruvate carboxylase activity during the crassulacean acid metabolism cycle. *Plant Physiol.*, 143: 1055–1057.
- Grobler, M. 2005. *Control of unwanted plants*. 1st edition. XACT Information Publication.
- Groenewald, A. 1996. Ekstra oes turksvye-in winter. *Landbouweekblad*, 6 Dec.: 34–37.
- Grunert, K.G., Larsen, H., Madsen, T.K. & Baadsgaard, A. 1996. *Market orientation in food and agriculture*. Boston, USA, Kluwer.
- Guevara Figueroa, T., Jiménez Islas, H., Reyes Escogido, M., Mortensen, A., Laursen, B.B., Lin, L.W., De León Rodríguez, A., Fomsgaard, I.S. & Barba de la Rosa, A.P. 2010. Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.). *J. Food Compos. Anal.*, 23: 525–532.
- Gugliuzza, G., Inglese, P. & Farina, V. 2002a. Relationship between fruit thinning an irrigation on determining fruit quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits. *Acta Hort.*, 581: 205–210.
- Gugliuzza, G., La Mantia, T. & Inglese, P. 2002b. Fruit load and cladode nutrient concentrations in cactus pear. *Acta Hort.*, 581: 221–224.
- Gutiérrez, L.H. 1992. *Plagas y enfermedades del nopal en México*. Mexico, Autonomous University of Chapingo.
- Guttermann, Y. 1995. Environmental factors affecting flowering and fruit development of *Opuntia ficus-indica* cuttings during the three weeks before planting. *Isr. J. Plant Sci.*, 43: 151–157.
- Habibi, Y., Mahrouz, M. & Vignon, M.R. 2002. Isolation and structure of D-xylans from pericarp seeds of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydr. Res.*, 337: 1593–1598.
- Habibi, Y., Heyraud, A., Mahrouz, M. & Vignon, M.R. 2004. Structural features of pectic polysaccharides from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydr. Res.*, 339: 1119–1127.
- Hahm, S.W., Park, J. & Son, Y.S. 2010. *Opuntia humifusa* partitioned extracts inhibit the growth of U87MG human glioblastoma cells. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 65: 247–252.
- Haile, M. & Belay, T. 2002. Current and potential use of cactus in Tigray, Northern Ethiopia. *Acta Hort.*, 581: 75–86.
- Haile, M., Belay, T. & Zimmermann, H.G. 2002. Current and potential use of cactus in Tigray, Northern Ethiopia. In A. Nefzaoui & P. Inglese, eds. Proceedings of the 4th International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hort.*, 581: 75–86.

- Hamilton, M.W. 1970. The comparative morphology of three cylindropuntias. *Am. J. Bot.*, 57: 1255–1263.
- Hammami, S.B.M., Aounallah, M.K., Sahli, A., Jebari, A. & Bettaieb, T. 2015. Modification of fruit growth and development of prickly pear according to the date of the second floral bud bloom. *Acta Hort.*, 1067: 27–30.
- Han, H. & Felker, P. 1997. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. *J. Arid Environ.*, 36: 133–148.
- Harlev, E., Nevo, E., Mirsky, N. & Ofir, R. 2013. Cancer preventive and curative attributes of plants of the cactaceae family: A review. *Planta Med.*, 79: 713–722.
- Haulik, T. 1988. Vrughteverbouwing vir somerreenstreek 13: turksy as eetvrug maar nou eers ontgin. *Landbouweekblad*, 10 Jun.: 48–51.
- Hayashi, H. 1989. Drying technologies of foods – their history and future. *Drying Technol.*, 7: 315–369.
- Heath, R.R., Teal, P.E.A., Epsky, N.D., Dueben, B.D., Hight, S.D., Bloem, S., Carpenter, J.E., Weissling, T.J., Kendra, P.E., Cibrian Tovar, J. & Bloem, K.A. 2006. Pheromone-based attractant for males of *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera: Pyralidae). *Environ. Entomol.*, 35: 1469–1476.
- Hegwood, D.A. 1990. Human health discoveries with *Opuntia* sp. (prickly pear) indica (L.) Mill. cladodes in the wound-healing process. *J. Hortic. Sci.*, 25: 1315–1316.
- Helsen, P., Verdyck, P., Tye A. & Van Dongen, S. 2009. Low levels of genetic differentiation between *Opuntia echios* varieties on Santa Cruz (Galapagos). *Plant Syst Evol.*, 279: 1–10.
- Herbach, K.M., Stintzing, F.C. & Carle, R. 2006. Betalain stability and degradation – structural and chromatic aspects. *J. Food Sci.*, 71: R41–R50.
- Hernández Pérez, R., Noa Carrazana, J.C., Gaspar, R., Mata, P. & Flores Estévez, N. 2009a. Detection of phytoplasma on Indian Fig (*Opuntia ficus-indica* Mill.) in Mexico Central Region. *OnLine J. Biol. Sci.*, 9: 62–66.
- Hernández Perez, T., Mejía Centeno, J., Cruz Hernández, A. & Paredes López, O. 2009b. Biochemical and nutritional characterization of three prickly pear species with different ripening behaviour and nutraceutical value of nopalitos. *Acta Hort.*, 841: 515–518.
- Hester, S.M. & Cacho, O. 2003. Modelling apple orchard systems. *Agric. Syst.*, 77: 137–154.
- Hfaiedh, N., Salah Allagui, M., Hfaiedh, M., El Feki, A., Zourgui, L. & Croute, F. 2008. Protective effect of cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladode extract upon nickel-induced toxicity in rats. *Food Chem. Toxicol.*, 46: 3759–3763.
- Hilbert, J. 2009. *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural.
- Hoffmann, W. 1995. Ethnobotany. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 12–19. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Hoffmann, J.H., Impson, F.A.C. & Volchansky, C.R. 2002. Biological control of cactus weeds: Implications of hybridization between control agent biotypes. *J. Appl. Ecol.*, 39: 900–908.
- Hogan, C. 2015. *Cactus* (available at <http://www.eoearth.org/view/article/162162>).
- Hokkanen, H.M.T. & Pimentel, D. 1989. New association in biological control: theory and practice. *Can. Entomol.*, 121: 829–840.
- Homrani Bakali, A. 2013. Impact of irrigation frequencies on the installation and the production of two forms of *Opuntia ficus-indica*. *Acta Hort.*, 995: 145–156.
- Horst, R.K. 2013. *Westcott's plant disease handbook*. Netherlands, Springer.
- Hosking, J.R. 2012. *Opuntia* spp. In N. Julien, R. McFadyen & J. Cullen, eds. *Biological control of weeds in Australia*, pp. 431–436. Melbourne, Australia, CSIRO Publishing.
- Hosking, J.R., McFadyen, R.E. & Murray, N.D. 1988. Distribution and biological control of cactus species in eastern Australia. *Plant Prot. Q.*, 3: 115–123.
- Huffpost Algeria. 2015. *La figue de Barbarie, un fruit venu d'ailleurs devenu produit du terroir en Algérie* (available at http://www.huffpostmaghreb.com/2015/08/04/n_7932698.html).
- Humair, F., Humair, L., Kuhn, F. & Keuffer, C. 2015. E-commerce trade in invasive plants. *Conserv. Biol.*, 10.
- Hunt, D. 2006. *The new cactus lexicon*. Milborne Port, UK, DH books.
- Hunt, D. & Taylor, N.P. 1986. The genera of the Cactaceae: towards a new consensus. *Bradleya*, 4: 65–78.
- Indexmundi. 2015. *Precios de mercado* (available at <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=urea&meses=129>). Accessed 10 November 2015.
- INEGI (National Institute of Statistics and Geography). 2010. *Censo de población y vivienda 2010* (available at <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/accesomicrodatos/cpv2010>). Accessed 18 September 2015.
- Inglese, P. 1995. Orchard planting management. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology cultivation and uses of cactus pear*, pp. 78–91. Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Inglese, P. 2010. Cactus pear, *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) for fruit production: An overview. *Cactusnet Newsletter*, 12: 82–92.
- Inglese, P. & Barbera, G. 1993. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) intensive production in Italy: an overview. In Proceedings of 4th Annual Texas Prickly Pear Council, 13–14 August, Kingsville, Texas, USA, pp. 13–23.
- Inglese, P., Barbera, G. & Carimi, F. 1994a. The effect of different amount of cladodes removal on reflowering of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L) Miller). *J. Hortic. Sci.*, 69: 61–65.
- Inglese, P., Israel, A.I. & Nobel, P.S. 1994b. Growth and CO₂ uptake for cladodes and fruit of the Crassulacean acid metabolism species *Opuntia ficus-indica* during fruit development. *Physiol. Plant.*, 91: 708–714.
- Inglese, P., Barbera, G., La Mantia, T. & Portolano, S. 1995a. Crop production, growth and ultimate fruit size of cactus pear following fruit thinning. *HortScience*, 30: 227–230.
- Inglese, P., Barbera, G. & La Mantia, T. 1995b. Research strategies for the improvement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality and production. *J. Arid Environ.*, 29: 455–468.
- Inglese, P., Barbera, G. & La Mantia, T. 1997. Competitive growth of fruits and cladodes of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill and thermal time requirement. *Acta Hort.*, 438: 29–36.
- Inglese, P., La Mantia, T., Chessa, I. & Nielddu, G. 1998. Evolution of endogenous gibberellins at different stages of flowering in relation to return bloom of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.). *Sci. Hort.*, 73: 45–51.
- Inglese, P., Barbera, B. & La Mantia, T. 1999. Seasonal reproductive and vegetative growth patterns, and resource allocation during cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. fruit growth. *HortScience*, 34: 69–72.
- Inglese, P., Basile, F. & Schirra, M. 2002a. Cactus pear fruit production. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 163–184. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Inglese, P., Gugliuzza, G. & La Mantia, T. 2002b. Alternate bearing and summer pruning of cactus pear. *Acta Hort.*, 581: 201–204.
- Inglese, P., Gugliuzza, G. & Liguori, G. 2009. Fruit production of cultivated cacti: a short overview on plant ecophysiology and C budget. *Acta Hort.*, 811: 77–86.
- Inglese, P., Costanza, P., Gugliuzza, G., Inglese, G. & Liguori, G. 2010. Influence of within-tree and environmental factors on fruit quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in Italy. *Fruits*, 65: 179–189.
- Inglese, P., Inglese, G. & Liguori, G. 2012. Fruit productivity and carbon gain of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. trees. *Isr. J. Plant Sci.*, 60(3): 283–90.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R.K. Pachauri & L.A. Meyer, eds. Geneva, Switzerland, IPCC. 151 pp.
- Jayakumar, R. & Kanthimathi, M.S. 2011. Inhibitory effects of fruit extracts on nitric oxide-induced proliferation in MCF-7 cells. *Food Chem.*, 126: 956–960.
- Jonas, A., Resenblat, G., Krapf, D., Bitterman, W. & Neeman, I. 1998. *Cactus flowers may prove beneficial in benign prostatic hiperplasia due to inhibition of 5α reductase activity, aromatase activity and lipid peroxidation*.
- Jones, P.K., Holtkamp, R.H., Palmer, W.A. & Day, M.D. 2014. The host range of three biotypes of *Dactylopius tomentosus* (Lamarck) (Hemiptera: Dactylopiidae) and their potential as biological control agents of *Cylindropuntia* spp. (Cactaceae) in Australia. *Biocontrol Sci. Technol.*, 25(6): 613–628.
- Ju, J., Bai, H., Zheng, Y., Zhao, T., Fang, R. & Jiang, L. 2012. A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus. *Nat Commun.*, 3: 1347.
- Julien, M.H. & Griffiths, M.W., eds. 1998. *Biological control of weeds. A world catalogue of agents and their target weeds*. 4th edition. Wallingford, UK, CAB International. 223 pp.
- Kang J., Park, J., Choi, S.H., Igawa, S. & Song, Y. 2012. *Opuntia humifusa* supplementation increased bone density by regulating parathyroid hormone and osteocalcin in male growing rats. *Int. J. Mol. Sci.*, 13: 6747–6756.
- Kang, J., Lee, J., Kwon, D. & Song, Y. 2013. Effect of *Opuntia humifusa* supplementation and acute exercise on insulin sensitivity and associations with PPAR-γ and PGC-1α protein expression in skeletal muscle of rats. *Int. J. Mol. Sci.*, 14: 7140–7154.
- Karawya, M.S., Wassel, G.M., Baghdadi, H.H. & Ammar, N.M. 1980. Mucilages and pectins of *Opuntia*, *Tamarindus* and *Cydonia*. *Planta Med.*, [Suppl.]: 68–75.
- Karim, M.R., Felker, P. & Bingham, R.L. 1997. Correlations between cactus pear (*Opuntia* spp.) cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality. *Ann. Arid Zone*, 37: 159–171.

- Kaufmann, J.C.** 2001. La Question des Raketa: Colonial struggles with prickly pear cactus in southern Madagascar, 1900–1913. *Ethnohistory*, 48(1–2): 7–120.
- Kaufmann, J.C.** 2004. Prickly pear cactus and pastoralism in southwest Madagascar. *Ethnology*, 43(4): 345–361.
- Keeley, J.E.** 1998. CAM photosynthesis in submerged aquatic plants. *Bot. Rev.*, 64(2): 121–175.
- Kiesling, R.** 1999a. Origen, domesticación y distribución de *Opuntia ficus-indica*. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 50–59 (available at <http://www.jpacd.org>).
- Kiesling, R.** 1999b. Nuevos sinónimos en *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae). *Hickenia*, 2(66): 309–314.
- Kiesling, R.** 2013. Historia de la *Opuntia ficus-indica*. *Cactusnet Newsletter*, 13 [special issue]: 13–18.
- Kiesling, R., Larocca, J., Faúndez, L., Metzinger, D. & Albesiano, S.** 2008. Cactaceae. In F.O. Zuloaga, O. Morrone & M. Belgrano, eds. *Catálogo de las plantas vasculares del cono Sur de América*, pp. 1715–1830. San Isidro, Argentina, Instituto Darwiniano, and St Louis, USA, Missouri Botanical Garden.
- Kim, W.G., Cho, W.D., Jee, H.J. & Hong, S.Y.** 2000. Occurrence of anthracnose on indian fig cactus caused by *Glomerella cingulata* and *Colletotrichum gloeosporioides*. *Plant Pathol. J.*, 16: 294–296.
- Kim, J.H., Park, S.M., Ha, H.J., Moon, C.J., Shin, T.K., Kim, J.M., Lee, N.H., Kim, H.C., Jang, K.J. & Wie, M.B.** 2006. *Opuntia ficus-indica* attenuates neuronal injury in vitro and in vivo models of cerebral ischemia. *J. Ethnopharmacol.*, 104: 257–262.
- Kim, H., Choi, H.K., Moon, J.Y., Kim, Y.S., Mosaddik, A. & Cho, S.K.** 2011. Comparative antioxidant and antiproliferative activities of red and white pitayas and their correlation with flavonoid and polyphenol content. *J. Food Sci.*, 76: C38–C45.
- Klein, H.** 1999. Biological control of three cactaceous weeds, *Pereskia aculeata* Miller, *Harrisia martinii* (Labouret) Britton and *Cereus jamacaru* De Candolle in South Africa. *Afr. Entomol. Mem.*, 1: 3–14.
- Klein, H.** 2011. A catalogue of the insects, mites and pathogens that have been used or rejected, or are under consideration for the biological control of invasive alien plants in South Africa. *Afr. Entomol.*, 19(2): 515–549.
- El Kossori, R.L., Villanume, C., El Boustani, E., Sauvare, Y. & Mejean, L.** 1998. Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus-indica* sp.). *Plant Foods Hum. Nutr.*, 52: 263–270.
- Kouba, M., Mhemdi, H. & Vorobiev, E.** 2015. Seed oil polyphenols: Rapid and sensitive extraction method and high resolution-mass spectrometry identification. *Anal. Biochem.*, 476: 91–93.
- Kull, C.A., Tassin, J., Moreau, S., Ramiarantsoa, H.R., Blanc Pamard, C. & Carrière, S.M.** 2012. The introduced flora of Madagascar. *Biological Invasions*, 14: 875–888.
- Kull, C.A., Tassin, J. & Carrière, M.** 2014. Approaching invasive species in Madagascar. *Madagascar Conserv. Dev.*, 9(2): 60–70.
- Kuti, J.O.** 1992. Growth and compositional changes during the development of prickly pear fruit. *J. Hortic. Sci.*, 67: 861–868.
- Kuti, J.O.** 2004. Antioxidant compounds from four *Opuntia* cactus pear varieties. *Food Chem.*, 85: 527–533.
- Kuti, J.O. & Galloway, C.M.** 1994. Sugar composition and invertase activity in prickly pear fruit. *J. Food Sci.*, 59: 387–388.
- Labib, S.** 1998. Planting cactus pear on raised beds versus planting on flat land. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 1–3.
- Labra, M., Grassi, F., Bardini, M., Imazio, S., Guiggi, A., Citerio, S., Banfi, E. & Sgorbati, S.** 2003. Genetic relationships in *Opuntia* Mill. genus (Cactaceae) detected by molecular marker. *Plant Sci.*, 165: 1129–1136.
- Labuschagne, M.T. & Hugo, A.** 2010. Oil content and fatty acid composition of cactus pear seed compared with cotton and grape seed. *J. Food Biochem.*, 34: 93–100.
- Lafone Quevedo, S.A.** 1927. *Tesoro de catarqueñismos*. Buenos Aires, Ed. Coni.
- Laguna, E., Deltoro, V.I., Ferrer, P.P., Novoa, A. & Guillot, D.** 2013. About binomen *Cylindropuntia rosea* (Cactaceae) and its invasive individuals recorded in the Valencian community (Spain). *Bouteloua*, 16: 40–51.
- Lakshminarayana, S. & Estrella, I.B.** 1978. Postharvest respiratory behavior of tuna (prickly pear) fruit (*Opuntia robusta* Mill.). *J. Hortic. Sci.*, 53: 327–330.
- La Mantia, T., Barbera, G. & Inglese, P.** 1997. Effect of cladode shading on growth and ripening of fruits of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller). *J. Hortic. Sci.*, 72: 299–304.
- La Mantia, T., Barbera, G., Gugliuzza, G. & Inglese, P.** 1998. Interazione tra irrigazione ed entità di fruttificazione e qualità dei frutti di ficodindia (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). In *Atti Giornate Scientifiche SOL*, San Remo, Italy, pp. 241–242.
- Laurenz, J.C., Collier, C.C. & Kuti, J.O.** 2003. Hypoglycaemic effect of *Opuntia lindheimeri* Engelm. in a diabetic pig model. *Phytother. Res.*, 17: 26–29.
- Lee, E.B., Hyun, J.E., Li, D.W. & Moon, Y.I.** 2001. The effect of *Opuntia ficus-indica* var. saboten fruit on gastric lesion and ulcer in rats. *Nat. Prod. Sci.*, 7: 90–93.
- Lee, E.B., Hyun, J.E., Li, D.W. & Moon, Y.I.** 2002a. Effects of *Opuntia ficus-indica* var. Saboten stem on gastric damages in rats. *Arch. Pharmacol. Res.*, 25: 67–70.
- Lee, J.C., Kim, H.R., Kim, J. & Jang, Y.S.** 2002b. Antioxidant property of an ethanol extract of the stem of *Opuntia ficus-indica* var. Saboten. *J. Agric. Food Chem.*, 50: 6490–6496.
- Lee, J.A., Jung, B.G. & Lee, B.J.** 2012. Inhibitory effects of *Opuntia humifusa* on 7,12-dimethylbenz[*a*]anthracene and 12-O-tetradecanoylphorbol-13-acetate induced two-stage skin carcinogenesis. *Asian Pac. J. Cancer Prev.*, 13: 4655–4660.
- Leeper, G.W.** 1960. *The Australian environment*. Melbourne, Australia, Melbourne University Press. 151 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1965. *Les cultures fourragères en Tunisie*. Document Technique No. 13. National Institute of Agronomical Research, Tunisia. 81 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1984. Rain use efficiency a unifying concept in arid land ecology. *J. Arid Environ.*, 7: 213–247.
- Le Houérou, H.N.** 1989. An assessment of the economic feasibility of fodder shrubs plantations with particular reference to Africa. In *The biology and utilization of shrubs*, pp. 603–630. San Diego, CA, USA, Academic Press.
- Le Houérou, H.N.** 1991. Feeding shrubs to sheep in the Mediterranean arid zone: intake performance and feed value. In *Proceedings of the Fourth International Rangeland Congress CIRAD (SCIST)*, 22–26 April 1991, Montpellier, France. 1279 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1992. The role of cacti in the agricultural development of Mediterranean arid zones. In *Proceedings of the Second International Cactus Pear and Cochineal Congress*, 22–25 September 1992, Santiago, Chile.
- Le Houérou, H.N.** 1994. *Drought-tolerant and water-efficient fodder shrubs (DTFS), their role as a "drought insurance" in the agricultural development of arid and semi-arid zones in southern Africa*. Report No. KV 65/94. Pretoria, Water Research Commission of South Africa. 139 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1995. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertification. *Options Méditerranéennes*, 10 [Serie B: Etudes et Recherches]. 396 pp.
- Le Houérou, H.N.** 1996a. The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *J. Arid Environ.*, 33: 135–159.
- Le Houérou, H.N.** 1996b. *Utilization of fodder trees and shrubs (TRUBS) in the arid and semi-arid zones of western Asia and northern Africa (WANA): history and perspectives*. A review. Hammamet, Tunisia, ICARDA/CIHEAM. 51 pp.
- Le Houérou, H.N.** 2002. Cacti (*Opuntia* spp.) as a fodder crop for marginal lands in the Mediterranean Basin. *Acta Hortic.*, 581: 21–46.
- Le Houérou, H.N., Correal, E. & Lailhacar, S.** 1991. New man-made agro-sylvo-pastoral production systems for the isoclimatic Mediterranean arid zone. In *Proceedings of the Fourth International Rangeland Congress*, Montpellier, France, pp. 383–388.
- Ledesma, N.R.** 2009. Our motherland was born with Santiago del Estero. In F. Rossi, ed. *Santiago del Estero—Argentina, History—Tradition—Culture*, pp. 9–20.
- Leuenberger, B.E.** 1988. Probleme der Taxonomie und Nomenklatur bei Nutzkakteen, insbesondere bei *Opuntia ficus-indica*, *O. streptacantha* und verwandten Taxa. Veröff. Lehre Angew. Forsch. *Weiterbildung*, 6: 55–72.
- Leuenberger, B.E.** 1991. Interpretation and typification of *Cactus ficus-indica* L. and *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (Cactaceae). *Taxon*, 40: 621–627.
- Leuenberger, B.E. & Arroyo Leuenberger, S.** 2014. Northern hemisphere *Opuntia* and *Cylindropuntia* species (Cactaceae) naturalized in Argentina – and the riddle of *Opuntia penicilligera*. *Succ. Plant Res.*, 8: 95–112.
- Liguori, G. & Inglese, P.** 2015. Cactus pear (*O. ficus-indica* (L.) Mill.) fruit production: eco-physiology, orchard and fresh-cut management. *Acta Hortic.*, 1067: 247–252.
- Liguori, G., Di Miceli, C., Gugliuzza, G. & Inglese, P.** 2006. Physiological and technical aspects of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) double reflowering and out-of-season winter fruit cropping. *Int. J. Fruit Sci.*, 6: 23–34.
- Liguori, G., Inglese, G., Pernice, F., Sortino, G. & Inglese, P.** 2013a. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. *Ital. J. Agron.*, 8: 14–20.
- Liguori, G., Inglese, G., Pernice, F., Sibani, R. & Inglese, P.** 2013b. CO₂ fluxes of *Opuntia ficus-indica* Mill. trees in relation to water status. *Acta Hortic.*, 995: 125–132.

- Lila, Z.A., Mohammed, N., Tatsuoka, N., Kanda, S., Kurokawa, Y. & Itabashi, H. 2004. Effect of cyclodextrin diallyl maleate on methane production, ruminal fermentation and microbes *in vitro* and *in vivo*. *Anim. Sci. J.*, 75: 15–22.
- Lima, M.C.A., Araújo, P.E.S., Cavalcanti, M.F.M., Dantas, A.P., Santana, O.P. & Farias, I. 1974. Competição de espécies e de espaçamentos de palma forrageira. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, Fortaleza, pp. 288–289.
- Lima, G.F.C., Rêgo, M.M.T., Aguiar, E.M., Silva, J.G.M., Dantas, F.D.G., Guedes, F.X. & Lôbo, R.N.B. 2015. Effect of different cutting intensities on morphological characteristics and productivity of irrigated Nopalea forage cactus. *Acta Hortic.*, 1067: 253–258.
- Lira Ortiz, A.L., Reséndiz Vega, F., Rios Leal, E., Contreras Esquivel, J.C., Chavarría Hernández, N., Vargas Torres, A. & Rodríguez Hernández, A.I. 2014. Pectins from waste of prickly pear fruits (*Opuntia albicarpa* Scheinvar): Chemical and rheological properties. *Food Hydrocolloids*, 37: 93–99.
- Llenderal, C. & Campos, F. 1999. Sistemas de producción de la grana cochinilla. In *Cria de 11a grana cochinilla del nopal para la producción de su pigmento*, pp. 61–67. Mexico, Postgraduate College.
- Lobell, D.B. & Gourdji, M.S. 2012. The influence of climate change on global crop productivity. *Plant Physiol.*, 160: 1686–1697.
- Lobos, E., Passos da Silva, D.M., Mena, J., Logarzo, G. & Varone, L. 2013. Principales plagas en *Opuntia*. *Cactus Newsletter*, 13 [Special issue]: 137–158.
- López Castañeda, J., Corrales García, J., Terrazas Salgado, T. & Colina León, T. 2010. Effect of saturated air treatments on weight loss reduction and epicuticular changes in six varieties of cactus pears fruit (*Opuntia* spp.). *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 12: 37–47.
- López Piñeiro, J.M., Fresquet Febrer, J.L., Lopez Terrada, M.L. & Pardo Tomas, J. 1992. *Medicinas, drogas y alimentos vegetales del nuevo mundo*. Madrid, Ministerio de Sanidad y Consumo.
- Lounsbury, C.P. 1915. Plant killing insects: the Indian cochineal. *Agric. J. Union S. Afr.*, 1: 537–543.
- Loza Cornejo, S. & Terrazas, T. 2003. Epidermal and hypodermal characteristics in North American Cactoideae (Cactaceae). *J. Plant Res.*, 116: 27–35.
- Lozano Gutierrez, J. & Espania Luna, M.P. 2008. Pathogenicity of *Beauveria bassiana* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) against the white grub *Laniifera cyclades* (Lepidoptera: Pyralidae) under field and greenhouse conditions. *Fla. Entomol.*, 91(4): 664–668.
- Luna Paez, A., Valadez Moctezuma, E., Barrientos Priego, A.F. & Gallegos Vázquez, C. 2007. Characterization of *Opuntia* spp. by means of seed with RAPD and ISSR markers and its possible use for differentiation. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 9: 43–59.
- Luo, Y. & Nobel, P.S. 1993. Growth characteristics of newly initiated cladodes of *Opuntia ficus-indica* as affected by shading, drought and elevated CO₂. *Physiol. Plant.*, 87: 467–474.
- Madjdoub, H., Rousdeli, S. & Dertani, A. 2001a. Polysaccharides from prickly pear and nopal of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behavior. *Polym. Int.*, 50: 552–560.
- Madjdoub, H., Roudesli, S., Picton, L., Le Cerf, D., Muller, G. & Grisel, M. 2001b. Prickly pear nopal pectin from *Opuntia ficus-indica*. Physicochemical study in dilute and semidilute solutions. *Carbohydr. Polym.*, 46: 69–79.
- Madruga Santillán, E., García Melo, F., Morales González, J.A., Vázquez Alvarado, P., Muñoz Juárez, S., Zuñiga Pérez, C., Sumaya Martínez, M.T., Madrigal Bujaidar, E. & Hernández Ceruelos, A. 2013. Antioxidant and anticlastogenic capacity of prickly pear juice. *Nutrients*, 5: 4145–4158.
- Mafra, R.C., Farias, I., Fernandes, A.P.M., Correia, E.B., Santana, O.P. & Wanderley, M.B. 1974. *Posição e número de artigos no plantio da palma Gigante* (*Opuntia ficus-indica*, Mill). Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia 9, Fortaleza, Brazil. 330 pp.
- Magallanes Quintanar, R., Valdez Cepeda, R.D., Blanco Macías, F., Márquez Madrid, M., Ruiz Garduño, R.R., Pérez Veyna, O., García Hernández, J.L., Murillo Amador, B., López Martínez, J.D. & Martínez Rubín de Celis, E. 2004. Compositional nutrient diagnosis in nopal (*Opuntia ficus-indica*). *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 6: 78–89.
- Magallanes Quintanar, R., Valdez Cepeda, R.D., Blanco Macías, F., Ruiz Garduño, R.R., Márquez Madrid, M., Macías Rodríguez, F.M., Murillo Amador, B., García Hernández, J.L. & Valdez Cepeda, R.D. 2006. Nutrient interactions in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and their effect on biomass production. *Acta Hortic.*, 728: 145–150.
- Magnano di San Lio, G. & Tirrò, A. 1983. Una moria del fícidindia causada da *Armillaria mellea*. *Inf. Fitopatol.*, 1: 47–50.
- Majure, L.C., Puente, R. & Pinkava, D.J. 2012a. Miscellaneous chromosome numbers in Opuntieae DC. (Cactaceae) with a compilation of counts for the group. *Haseltonia*, 18: 67–78.
- Majure, L.C., Puente, R., Griffith, M.P., Judd, W.S., Soltis, P.S. & Soltis, D.E. 2012b. Phylogeny of *Opuntia* s.s. (Cactaceae): Clade delineation, geographic origins, and reticulate evolution. *Am. J. Bot.*, 99(5): 847–864.
- Majure, L.C., Judd, W.S., Soltis, P.S. & Soltis, D.E. 2012c. Cytogeography of the *Humifusa* clade of *Opuntia* s.s. Mill. 1754 (Cactaceae: Opuntioideae): Correlations with geographic distributions and morphological differentiation of a polyploid complex. *Comparative Cytogenetics*, 6: 53–77.
- Maki Díaz, G., Peña Valdivia, C.B., García Nava, R., Arévalo Galarza, L., Calderón Zavala, G. & Anaya Rosales, S. 2015. Physical and chemical characteristics of cactus stems (*Opuntia ficus-indica*) for exportation and domestic markets. *Agrociencia*, 49: 31–51.
- Malik, F.T., Clement, R.M., Gethin, D.T., Beysens, D., Cohen, R.E., Krawszik, W. & Parker, A.R. 2015. Dew harvesting efficiency of four species of cacti. *Bioinspir. Biomim.*, 10(3): 036005.
- Maltsberger, W.A. 1991. Feeding and supplementing prickly pear cactus to beef cattle. In Proceedings of the Second Annual Texas Prickly Pear Council, 16–17 August 1991, McAllen, Texas, USA, pp. 104–117.
- Mann, J. 1969. *Cactus-feeding insects and mites*. Bulletin 256. Washington, DC, United States National Museum. 158 pp.
- Mann, J. 1970. *Cacti naturalized in Australia and their control*. Queensland, Australia, Department of Lands. 128 pp.
- Margolis, E., Silva, A.B. & Jacques, F.O. 1985. Determinação dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo para as condições de Caruaru (PE). *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 9: 165–169.
- Marín, R. 1991. *Dactilopus coccus* (Costa), cochinilla de la tuna sobre *Opuntia ficus-indica*. *Quepo*, 5: 37–43.
- Marín, R., & Cisneros, F. 1977. Biología y morfología de la cochinilla del carmín, *Dactylopius coccus* Costa (Homoptera: Dactylopiidae). *Rev. Per. Entomol.*, 20(1): 115–120.
- Marsico, T.D., Wallace, L.E., Erwin, G.N., Brooks, C.P., McClure, J.E. & Welch, M.E. 2011. Geographic patterns of genetic diversity from the native range of *Cactoblastis cactorum* (Berg) support the document history of invasion and multiple introductions for invasive populations. *Biological Invasions*, 13: 857–868.
- Martin Belloso, O., Soliva Fortuny, R. & Oms Olliu, G. 2007. Fresh-cut fruits. In Y.H. Hui, ed. *Handbook of food products manufacturing*, pp. 879–970. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- Matamala, P., Mora, M. & Sáenz, C. 2015. Evaluación de las preferencias de los consumidores en tunas de colores en dos estados de madurez. Faculty of Agronomic Sciences. University of Chile. Unpublished data.
- Mathenge, C.W., Holford, P., Hoffmann, J.H., Zimmermann, H.G., Spooner Hart, R. & Beattie, G.A.C. 2009. Distinguishing suitable biotypes of *Dactylopius tomentosus* (Hemiptera: Dactylopiidae) for biological control of *Cylindropuntia fulgida* var. *fulgida* (Caryophyllales: Cactaceae) in South Africa. *Bull. Entomol. Res.*, 99: 619–627.
- Matsushiro, B., Lillo, L., Sáenz, C., Urzúa, C. & Zárate, O. 2006. Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydr. Polym.*, 63: 263–267.
- Matthäus, B. & Özcan, M.M. 2011. Habitat effects on yield, fatty acid composition and tocopherol contents of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) seed oils. *Sci. Hortic.*, 131: 95–98.
- Mauseth, J.D. 1980. Release of whole cells of *Nopalea* (Cactaceae) into secretory canals. *Bot. Gaz.*, 141: 15–18.
- Mauseth, J.D. 1984. Effect of growth rate, morphogenic activity and phylogeny on shoot apical ultrastructure in *Opuntia polyacantha* (Cactaceae). *Am. J. Bot.*, 71: 1283–1292.
- Mauseth, J.D. 1989. Comparative structure-function studies within a single strongly dimorphic species, *Melocactus intortus* (Cactaceae). *Bradleya*, 7: 1–12.
- Mauseth, J.D. 1996. Comparative anatomy of tribes Cereeae and Browningieae (Cactaceae). *Bradleya*, 14: 66–81.
- Mauseth, J.D. 1999a. Anatomical adaptations to xeric conditions in *Maihuenia* (Cactaceae), a relictual, leaf-bearing cactus. *J. Plant Res.*, 112: 307–315.
- Mauseth, J.D. 1999b. Comparative anatomy of *Espositoa*, *Pseudoespositoa*, *Thrixanthocereus*, and *Vatricania* (Cactaceae). *Bradleya*, 17: 33–43.
- Mauseth, J.D. 2000. Theoretical aspects of surface-to-volume ratios and water-storage capacities of succulent shoots. *Am. J. Bot.*, 88: 1107–1115.
- Mauseth, J.D. 2004. Wide-band tracheids are present in almost all species of Cactaceae. *J. Plant Res.*, 117: 69–76.
- Mauseth, J.D. 2005. Anatomical features, other than wood, in subfamily Opuntioideae (Cactaceae). *Haseltonia*, 11: 2–14.

- Mauseth, J.D.** 2006a. Structure–function relationships in highly modified shoots of Cactaceae. *Ann. Bot.*, 98: 901–926.
- Mauseth, J.D.** 2006b. Wood in the cactus subfamily Opuntioideae has extremely diverse structure. *Bradleya*, 24: 93–106.
- Mauseth, J.D. & Kiesling, R.** 1997. Comparative anatomy of *Neoraimondia roseiflora* and *Neocardenasia herzogiana* (Cactaceae). *Haskelltonia*, 5: 37–50.
- Mauseth, J.D. & Ross, R.** 1988. Systematic anatomy of the primitive cereoid cactus *Lep-tocereus quadricostatus*. *Bradleya*, 6: 49–64.
- Mayorga, M.C., Urbiola, M.C., Suárez, R. & Escamilla, S.H.M.** 1990. Estudio agronómico de xoconostle *Opuntia* spp en la zona semiárida del Estado de Querétaro. En Memoria 3ª Reunión Nacional 1ª Reunión Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del nopal. Ed. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Saltillo, Coahuila, Mexico.
- McConn, M. & Nakata, A.** 2004. Oxalate reduces calcium availability in the pads of prickly pear cactus through formation of calcium oxalate crystals. *J. Agric. Food Chem.*, 52: 1371–1374.
- McFadyen, R.E.** 1979. The cactus mealybug *Hypogeococcus festerianus* (Hem.: Pseudococcidae) an agent for the biological control of *Harrisia martinii* (Cactaceae) in Australia. *Entomophaga*, 24: 281–287.
- McFadyen, R.E. & Tomley, A.J.** 1981. Biological control of *Harrisia* cactus, *Eriocereus martinii*, in Queensland by the mealybug *Hypogeococcus festerianus*. In E.S. Delfosse, ed. Proceedings of the Fifth International Symposium on Biological Control of Weeds, pp. 589–594. Canberra, CSIRO.
- McLeod, M.G.** 1975. A new hybrid fleshy-fruited prickly-pear in California. *Madroño*, 23: 96–98.
- Meckes Lozoya, M. & Roman Rams, R.** 1986. *Opuntia streptacantha*, a coadjutor in the treatment of Diabetes mellitus. *Am. J. Chin. Med.*, 14: 116–118.
- Medeiros, G.R. de, Farias, J.J. de, Ramos, J.L.F. & Silva, D.S.** 1997. Efeito do espaçamento e da forma de plantio sobre a produção da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*, Mill), no semi-árido. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 34, Juiz de Fora, pp. 231–233
- Medina Torres, L., Brito De La Fuente, F., Torrestiana Sanchez, B. & Kattthain, R.** 2000. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids*, 14: 417–424.
- Medina Torres, L., García Cruz, E.E., Calderas, F., González Laredo, R.F., Sánchez Olivares, G., Gallegos Infante, J.A., Rocha Guzmán, N.E. & Rodríguez Ramírez, J.** 2013. Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*). *LWT – Food Sci. Technol.*, 50: 642–650.
- Mena Covarrubias, J.** 2011. Alternativas para el manejo integral de grana cochinilla, *Dactylopius opuntiae* Cockerell (Hemiptera: Dactylopiidae) en nopal tunero. In A.R.E. Vazquez, F. Blanco, M.R. Blanco & C. Valdez, eds. Memorias del X Simposium–Taller Nacional y III Internacional de Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey, pp. 73–81. Campus de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Nuevo Leon, Escobedo, NL, Mexico. 300 pp.
- Mena Covarrubias, J.** 2012. Plagas de importancia económica para la producción de nopal en México. In F. Blanco Macías, R.E. Vázquez Alvarado, R.D. Valdez Cepeda & J.A. Santos Haliscak, eds. Memorias del XI Simposium–Taller Nacional y IV Internacional de Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey, pp. 133–147. Campus de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Nuevo Leon. Escobedo, NL, Mexico. 236 pp.
- Mena Covarrubias, J.** 2013. Tecnologías de manejo integrado para los insectos plaga del nopal tunero en el Altiplano Mexicano. In C. Gallegos Vázquez, S. De J. Méndez Gallegos & C. Mondragón Jacobo, eds. *Producción sustentable de tuna en San Luis Potosí*, pp. 125–161. Colegio de Postgraduados – Fundación Produce San Luis Potosí. San Luis Potosí, Mexico.
- Mena Covarrubias, J.** 2014. Evaluación de los métodos para control de insectos plaga en nopal tunero en México. In F. Blanco Macías, R.E. Vázquez Alvarado, R.D. Valdez Cepeda & J.A. Santos Haliscak, eds. Memorias del XII Simposium–Taller Nacional y V Internacional de Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey, pp. 79–86. Campus de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Nuevo Leon. Escobedo, NL, Mexico. 244 pp.
- Méndez Gallegos, S.J.** 1992. *Tasas de supervivencia y reproducción de la grana cochinilla Dactylopius coccus (Homoptera: Dactylopiidae) a diferentes temperaturas*. Montecillo, State of Mexico, Postgraduate College (MSc thesis). 70 pp.
- Méndez Gallegos, S.J.** 2013. De los montes a la biofábrica: La evolución de los sistemas de cría de la cochinilla. In L. Portillo & A.L. Viguera, eds. *Conocimiento y aprovechamiento de la grana cochinilla*, pp. 135–144. First edition. University of Guadalajara, Mexico.
- Méndez Gallegos, S.J. & Martínez Hernández, J. de J.** 1988. Efecto de la fertilización química y orgánica en tres formas de nopal (*Opuntia* spp), sobre el rendimiento, en una plantación comercial de ojalcaliente, Zatecas. En Memorias Reunión Nacional e Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Universidad Autónoma Agraria, Saltillo, Mexico, pp. 127–144.
- Méndez Gallegos, S.J., García, H.J., Rössel, A., Tarango, A., Talavera, M. & Figueroa, B.** 2004. *Recomendaciones para el establecimiento de plantaciones de nopal en el Altiplano Potosino*. Coedición Colegio de Postgraduados. Comisión Nacional de las Zonas Áridas. 24 pp.
- Méndez Gallegos, S.J., Talavera Magaña, D. & García Herrera, E.J.** 2009. VII Simposium–Taller “Producción y aprovechamiento del nopal en el Noreste de México”. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 2 [Edición Especial].
- Menezes, C.M.D.** 2008. *Effects of sun-dried Opuntia ficus-indica cladodes on digestive processes in sheep*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc dissertation).
- Menezes, C.M.D. da C., Schwalbach, L.M.J., Combrinck, W.J., Fair, M.D. & De Waal, H.O.** 2010. Effects of sun-dried *Opuntia ficus-indica* on feed and water intake and excretion of urine and faeces by Dorper sheep. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 40: 491–494.
- Menke, K.H. & Steingass, H.** 1988. Estimation of the energetic feed value from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Anim. Res. Dev.*, 28: 7–55.
- Merin, U., Gagel, S., Popel, G., Bernstein, S. & Rosenthal, I.** 1987. Thermal degradation kinetics of prickly-pear–fruit red pigment. *J. Food Sci.*, 52: 485–486.
- Metcalf, C.R. & Chalk, L.** 1979. *Anatomy of the dicotyledons. Part VII, Epicuticular wax and its morphology*. Vol. 1, 2nd ed, pp. 158–160. Oxford, UK, Clarendon Press.
- Middleton, K.** 1999. Who killed ‘Malagasy Cactus’? Science, environment and colonialism in southern Madagascar (1924–1930). *J. South. Afr. Stud.*, 25(2): 215–248.
- Migliore, G., Cembalo, L., Caracciolo, F. & Schifani, G.** 2012. Organic consumption and consumer participation in food community networks. *New Medit.*, 11(4) [suppl.]: 46–48.
- Migliore, G., Galati, A., Romeo, P., Crescimanno, M. & Schifani, G.** 2015a. Quality attributes of cactus pear fruit and their role in consumer choice. The case of Italian consumers. *Br. Food J.*, 117(6): 1637–1651.
- Migliore, G., Crescimanno, M., Schifani, G., Romeo, P. & Galati, A.** 2015b. Quality perception and consumer choice of cactus pear: Results of direct survey in Italy. Proceedings of the VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hort.*, 1067: 275–282.
- Mimouni, A., Ait Lhaj, A. & Ghazi, M.** 2013. Mineral nutrition effect on cactus (*Opuntia ficus* spp.): growth and development. *Acta Hort.*, 995: 2013.
- Misra, A.K., Mishra, A.S., Tripathi, M.K., Chaturvedi, O.H., Vaithyanathan, S., Prasad, R. & Jakhmol, R.C.** 2006. Intake, digestion and microbial protein synthesis in sheep on hay supplemented with prickly pear cactus [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] with or without groundnut meal. *Small Ruminant Res.*, 63: 125–134.
- Mohamed Yasheen, Y., Barringer, S.A. & Splittstoesser, W.E.** 1996. A note on the uses of *Opuntia* spp. in Central/North America. *J. Arid Environ.*, 32: 347–353.
- Mohammed, N., Lila, Z.A., Ajjaska, N., Hara, K., Mikuni, K., Kanda, S. & Itabashi, H.** 2004. Inhibition of ruminal microbial methane production by β -cyclodextrin iodopropane, malate and their combination *in vitro*. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 88: 188–195.
- Mokoboki, K., Kgama T. & Mmbi, N.** 2009. Evaluation of cactus pear fruit quality at Mara ADC, South Africa. *Afr. J. Agric. Res.*, 4(1): 28–32.
- Mondragón Jacobo, C.** 1999. Low input agricultural systems based on cactus pear for subtropical semiarid environments. In J. Janick, ed. *Perspectives on new crops and new uses*, pp. 367–372. Alexandria, VA, USA, ASHS Press.
- Mondragón Jacobo, C.** 2001. Cactus pear domestication and breeding. *Plant Breed Rev.*, 20: 135–166.
- Mondragón Jacobo, C. & Bordelon, B.B.** 1996. Cactus pear (*Opuntia* spp. Cactaceae) breeding for fruit production. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 1: 19–35.
- Mondragón Jacobo, C. & Bordelón, B.** 2002. Presencia de apomixis en cruces de nopales mexicanos y su identificación molecular preliminar. *Rev. Fitotec. Mex.*, 25(3): 247–252.
- Mondragón Jacobo, C. & Chessa, I.** 2013. A global perspective on genetic resources of cactus pear: An asset for the future sustainability of semiarid lands. *Acta Hort.*, 995: 19–26.
- Mondragón Jacobo, C. & Doudareva, N.** 2000. DNA extraction from several cacti. *HortScience*, 35: 1124–1126.
- Mondragón Jacobo, C. & Pérez González, S.** 1994. ‘Reyna’ (syn. ‘Alfajayucan’) is the leading cactus pear cultivar in Central Mexico. *Fruit Var. J.*, 48: 134–136.
- Mondragón Jacobo, C. & Pérez González, S.** 1996. Native cultivars of cactus pear in Mexico. In J. Janick, ed. *Progress in new crops*, pp. 446–450. Arlington, VA, USA, ASHS Press.

- Mondragón Jacobo, C. & Pérez González, S.** 2001. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO. 140 pp.
- Mondragón Jacobo, C. & Pimienta Barrios, E.** 1990. *Fertilización del nopal tunero*. Folleto Técnico No. 1. Campo Experimental Norte de Guanajuato. Guanajuato, Mexico, INIFAP.
- Mondragón Jacobo, C. & Pimienta Barrios, E.** 1995. Propagation. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 64–70. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Mondragón Jacobo, C. & Tegegne, F.** 2006. Cactus pear production systems in Tigray, Northern Ethiopia. *Acta Hortic.*, 728: 59–70.
- Mondragón Jacobo, C., Fernandez, M.R. & Estrada, C.H.** 1995. Ampliación de la época de cosecha de la tuna. In Pimienta Barrios *et al.*, eds. Proceedings of the Fifth National and Fourth International Cactus Pear Congress, Guadalajara, Mexico, pp. 265–295.
- Mondragón Jacobo, C., Gallegos Vazques, C. & Martínez González, J.C.** 2009. Cactus pear off-season production: a topic of interest for Mexican growers after market globalization. *Acta Hortic.*, 811: 409–414.
- Mondragón, J.C., Huerta, E.E. González Ch. M.M. & Mora, A.M.A.** 2012. *Propagación tecnificada del nopal para reducir incidencia de enfermedades y multiplicar nuevas variedades*. Folleto Técnico No. 8. Campo Experimental Bajío. Celaya, México, INIFAP.
- Monjauze, A. & Le Houérou, H.N.** 1965a. Le rôle des Opuntia dans l'économie agricole nord africaine. *Bull. Ecole Nat. Sup. Agric. Tunis*, 8–9: 85–165.
- Monjauze, A. & Le Houérou, H.N.** 1965b. *Les Opuntia dans l'économie agricole nord-africaine*. Rome, FAO. 92 pp.
- Monterroso Rivas, A.I., Conde Álvarez, C., Rosales Dorantes, G. & Gómez Díaz, J.D.** 2011. Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in Mexico. *Atmosfera*, 24: 53–67.
- Montefiori, D.** 1990. *Ricerche sull'estrazione, la stabilità e l'impiego dei pigmenti del fico d'indiasanguigno*. Milan, Italy, University of Milan (thesis).
- Monteiro, C.C.F., Melo, A.A.S., Ferreira, M.A., Campos, J.M.S., Souza, J.S.R., Silva, E.T.S., Andrade, R.P.X. & Silva, E.C.** 2014. Replacement of wheat bran with spineless cactus (*Opuntia ficus indica* Mill cv Gigante) and urea in the diets of Holstein × Gyr heifers. *Trop. Anim. Health Prod.*, 46: 1149–1154
- Montiel, L.** 1995. *Morfología de Dactylopius coccus Costa (Homoptera: Dactylopiidae), y su biología y reproducción en dos fotoperiodos*. Mexico, Postgraduate College (MSc thesis). 106 pp.
- Mora, M., Espinoza, J., Schnettler, B. & Echeverría, G.** 2011. Perceived quality in fresh peaches: an approach through structural equation modeling. *Cienc. Invest. Agrar.*, 38(2): 179–190.
- Mora, M., Cortés, M., Sanhueza, C. & Sáenz C.** 2013. Innovation requirements for the development of cactus pear for export: a new item to be incorporated to the Chilean fruit export sector. Proceedings of the 7th International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hortic.*, 995: 229–236.
- Morales, M., Sáenz, C. & Robert, P.** 2009. Bioactive compounds in toppings from colored cactus pear cultivated in Chile. *Acta Hortic.*, 811: 127–130.
- Moran, V.C.** 1980. Interactions between phytophagous insects and their Opuntia hosts. *Ecol. Entomol.*, 5(2): 153–164.
- Moran, V.C. & Annecke, D.P.** 1979. Critical reviews of biological pest control in South Africa. 3. The jointed cactus, *Opuntia aurantiaca* Lindley. *J. Entomol. Soc. South. Afr.*, 42: 299–329.
- Moran, V.C. & Cabby, B.S.** 1979. On the life-history and fecundity of the cochineal insect, *Dactylopius austrinus* De Lotto (Homoptera: Dactylopiidae), a biological control agent for the cactus *Opuntia aurantiaca*. Commonwealth Agricultural Bureaux. *Bull. Entomol. Res.*, 69: 629–636.
- Moran, V.C. & Zimmermann, H.G.** 1984a. The biological control of cactus weeds of minor importance in South Africa. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 37: 35–55.
- Moran, V.C. & Zimmermann, H.G.** 1984b. The biological control of cactus weeds: achievements and prospects. *Biocontrol News Inf.*, 5: 297–320.
- Moringo, M.A.** 1966. *Diccionario de Americanismos*. Buenos Aires, Mochnik Ed.
- El Moselhy, M.M., Sengupta, A.K. & Smith, R.** 2011. Carminic acid modified anion exchanger for the removal and preconcentration of Mo(VI) from wastewater. *J. Hazard. Mater.*, 185: 442–446.
- Mosshammer, M.R., Stintzing, F.C. & Carle, R.** 2006. Evaluation of different methods for the production of juice concentrates and fruit powders from cactus pear. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 7: 275–287.
- El Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbab, M., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B. & Cherkaoui Malki, M.** 2014. Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19: 14879–14901.
- Mottram, R.** 2013. Linnaean cactus legacy. *Cactician*, 3: 1–83.
- Mow, V.C., Gunn, B.H. & Walter, G.H.** 1982. Wind dispersal and settling of first-instar crawlers of the cochineal insect *Dactylopius austrinus* (Homoptera: Coccoidea: Dactylopiidae). *Ecol. Entomol.*, 7: 409–419.
- Mulas, M.** 1991. *Rooting experiments in one year old cladodes of Opuntia ficus-indica Mill.* International Symposium on Cactus Pear Fruit, Lagos de Morena, Jalisco, Mexico. 7 pp.
- Mulas, M.** 1992. Blossoming and fructification cycle of *Opuntia ficus-indica* Mill. in the Mediterranean environment. In Proceedings of the Second International Conference on Prickly Pear and Cochineal, 22–25 September, Santiago, Chile, pp. 53–60.
- Mulas, M.** 1997. Flower removal time and fruit quality in cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *Acta Hortic.*, 438: 123–128.
- Mulas, M. & D'Hallewin, G.** 1992. Improvement pruning and the effects on vegetative and yield behaviour in prickly pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivar 'Gialla'. *Acta Hortic.*, 296: 139–146.
- Mulas, M. & D'Hallewin, G.** 1997. Fruit quality of four cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivars as influenced by irrigation. *Acta Hortic.*, 438: 115–122.
- Mulas, M., D'Hallewin, G. & Canu, G.** 1992. Osservazioni sulla radicazione di cladode di anno di *Opuntia ficus-indica* Mill. *Frutticoltura*, 19: 67–70.
- Muñoz de Chávez, M., Chávez, A., Valles, V. & Roldán, J.A.** 1995. The Nopal: A plant of manifold qualities. *World Rev. Nutr. Diet.*, 77: 109–134.
- Nasr, Y.** 2015. Cactus pear in Jordan: current status, potential and opportunities. *Acta Hortic.*, 1067: 299–303.
- Nasr, Y. & Jamjoum, K.** 2002. The performance of *Opuntia ficus-indica* seedlings that resulted from different number of joint mature cladodes at two planting dates. *Acta Hortic.*, 581: 159–163.
- Nazareno, M.A.** 2014. Phytochemicals of nutraceutical importance from cactus and their role in human health. In D. Prakash & G. Sharma. *Phytochemicals of nutraceutical importance and their role in human health*, pp. 103–115. Oxford, UK, CAB.
- Ncibi, S., Ben Othman, M., Akacha, A., Kri-fi, M.N. & Zourgui, L.** 2008. *Opuntia ficus indica* extract protects against chlorpyrifos-induced damage on mice liver. *Food Chem. Toxicol.*, 46: 797–802.
- Nefzaoui, A.** 2009. Cactus: A crop to meet the challenges of climate change in dry areas. *Ann. Arid Zone*, 48: 1–18.
- Nefzaoui, A. & Ben Salem, H.** 2001. *Opuntia* – A strategic fodder and efficient tool to combat desertification in the WANA region. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 73–90. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Nefzaoui, A. & Ben Salem, H.** 2006. Cactus: un banco de alimentos para ganado en entornos áridos y semiáridos. *Cactusnet Newsletter*, 10 [Número Especial]: 41–57.
- Nefzaoui, A. & El Mourid, M.** 2008. Cash from cactus. *Appropriate Technol.*, 35: 18–20.
- Nefzaoui, A. & El Mourid, M.** 2009. Cacti: a key stone crop for the development in marginal lands and to combat desertification. *Acta Hortic.*, 811: 365–372.
- Nefzaoui, A. & El Mourid, M.** 2010. Cactus pear for soil and water conservation in arid and semi-arid lands. Improved utilization of cactus pear for food, feed, soil and water conservation and other products in Africa. *Cactusnet Newsletter*, 12 [Special Issue]. 224 pp.
- Nefzaoui, A., Ketata, H. & El Mourid, M.** 2011. Agricultural technological and institutional innovations for enhanced adaptation to environmental change in North Africa. In S.S. Young & S.E. Silvern, eds. *International perspectives on global environmental change*, pp. 57–84. InTech.
- Nefzaoui, A., Louhaichi, M. & Ben Salem, H.** 2014. Cactus as a tool to mitigate drought and to combat desertification. *J. Arid Land Stud.*, 24(1): 121–124.
- Negesse, T., Makkar, H.P.S. & Becker, K.** 2009. Nutritive value of some non-conventional feed resources of Ethiopia determined by chemical analyses and an in vitro gas method. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 154: 204–217.
- Nelson, E.A., Sage, T.L. & Sage, R.F.** 2005. Functional leaf anatomy of plants with Crasulacean acid metabolism. *Funct. Plant Biol.*, 32: 409–419.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1992. Effect of fertilization on prickly pear production in Israel. In Proceedings of the Third Annual Texas Prickly Pear Council Meeting, Texas A&M University, Kingsville, Texas, USA, pp. 1–6.

- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1993. Modern cultivation of prickly pear in Israel. *Acta Hortic.*, 349: 235–237.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1994. Effect of nitrogen fertilization and organ removal on rebudding in *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Sci. Hortic.*, 59: 115–122.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1995a. Effect of low winter temperatures on bud break in *Opuntia ficus-indica*. *Adv. Hortic. Sci.*, 9: 1–4.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1995b. Reproductive biology. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 49–57. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Nerd, A. & Mizrahi, Y.** 1997. Reproductive biology of cactii. *Hortic. Rev.*, 18: 321–346.
- Nerd, A. & Nobel, P.S.** 1991. Effects of drought on water relations and nonstructural carbohydrates in cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Physiol. Plant.*, 81: 495–500.
- Nerd, A. & Nobel, P.S.** 1995. Accumulation, partitioning and assimilation of nitrate in *Opuntia ficus-indica*. *J. Plant Nutr.*, 18: 2533–2549.
- Nerd, A., Karadi, A. & Mizrahi, Y.** 1989. Irrigation, fertilisation and polyethylene covers influence bud development in prickly pear. *HortScience*, 24: 773–775.
- Nerd, A., Karady, A. & Mizrahi, Y.** 1991a. Out of season prickly pear: fruit characteristics and effect of fertilization and short droughts on productivity. *HortScience*, 26: 337–342.
- Nerd, A., Karadi, A. & Mizrahi, Y.** 1991b. Out-of-season prickly pear: fruit characteristics and effect of fertilisation and short droughts on productivity. *J. Hortic. Sci.*, 26: 527–529.
- Nerd, A., Karadi, A. & Mizrahi, Y.** 1991c. Salt tolerance of prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*). *Plant Soil (Netherlands)*, 137: 201–207.
- Nerd, A., Mesika, R. & Mizrahi, Y.** 1993a. Effect of N fertilizer on autumn flush and cladode N in prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *J. Arid Environ.*, 68: 337–342.
- Nerd, A., Mesika, R. & Mizrahi, Y.** 1993b. Effect of N fertiliser on autumn floral flush and cladode N in prickly pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *J. Hortic. Sci.*, 68: 545–550.
- Nerd, A., Tel Zur, N. & Mizrahi, Y.** 2002. Fruits of vine and columnar cacti. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 185–198. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Newbold, C.J., Lopez, S., Nelson, N., Ouda, J.O., Wallace, R.J. & Moss, A.R.** 2005. Proportionate precursors and other metabolic intermediates as possible alternative electron acceptors to methanogenesis in ruminal fermentation *in vitro*. *Br. Food J.*, 94: 27–35.
- Nieddu, G. & Spano D.** 1992. Flowering and fruit growth in *Opuntia ficus-indica*. *Acta Hortic.*, 296: 153–159.
- Nobel, P.S.** 1982. Orientation, PAR interception and nocturnal acidity increases for terminal cladodes of a widely cultivated cactus *Opuntia ficus-indica*. *Am. J. Bot.*, 69: 1462–1469.
- Nobel, P.S.** 1983. Nutrient levels in cacti: relation to nocturnal acid accumulation and growth. *Am. J. Bot.*, 70: 1244–1253.
- Nobel, P.S.** 1988. *Environmental biology of agaves and cacti*. Cambridge, NY, USA, Cambridge University Press. 270 pp.
- Nobel, P.S.** 1991. Tansley Review No. 32. Achievable productivities of certain CAM plants: basis for high values compared with C 3 and C 4 plants. *New Phytol.*, 119: 183–205.
- Nobel, P.S.** 1994. *Remarkable agaves and cacti*. New York, USA, Oxford University Press. 180 pp.
- Nobel, P.S.** 1995. Environmental biology. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 36–48. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Nobel, P.S.** 1998. *Los incomparables agaves y cactus*. Mexico, Editorial Trillas. 211 pp.
- Nobel, P.S.** 2001. Ecophysiology of *Opuntia ficus-indica*. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 13–19. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Nobel, P.S.** 2002. Cactus physiological ecology, emphasizing gas exchange of *Platyopuntias* fruit. *Acta Hortic.*, 58: 143–150.
- Nobel, P.S., ed.** 2002. *Cacti: Biology and uses*. Berkeley, CA, USA, University of California Press. 280 pp.
- Nobel, P.S.** 2006. Parenchyma-chlorenchyma water movement during drought for the hemiepiphytic cactus *Hylocereus undatus*. *Ann. Bot.*, 97: 469–474.
- Nobel, P.S.** 2009. *Desert wisdom, agaves and cacti, CO₂ water, climate change*. New York, USA, iUniverse. 198 pp.
- Nobel, P.S. & Bobich, E.G.** 2002. Environmental biology. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 57–74. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Nobel, P.S. & Castaneda, M.** 1998. Seasonal light and temperature influences on organ initiation for unrooted cladodes of prickly pear cactus *Opuntia ficus-indica*. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 123: 47–51.
- Nobel, P.S. & De la Barrera, E.** 2003. Tolerances and acclimation to low and high temperatures for cladodes, fruits and roots of a widely cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. *New Phytol.*, 157: 271–279.
- Nobel, P.S. & De la Barrera, E.** 2004. CO₂ uptake by the cultivated hemiepiphytic cactus, *Hylocereus undatus*. *Ann. Appl. Biol.*, 144: 1–8.
- Nobel, P.S. & García de Cortázar, V.** 1991. Growth and predicted productivity of *Opuntia ficus-indica* for current and elevated carbon dioxide. *Agron. J.*, 83: 224–230.
- Nobel, P.S. & Hartsock, T.L.** 1983. Relationships between photosynthetically active radiation, nocturnal acid accumulation, and CO₂ uptake for a crassulacean acid metabolism plant, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.*, 71: 71–75.
- Nobel, P.S. & Hartsock, T.L.** 1984. Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth temperature. *Physiol. Plant.*, 60: 98–105.
- Nobel, P.S. & Israel, A.A.** 1994. Cladode development, environmental responses of CO₂ uptake, and productivity for *Opuntia ficus-indica* under elevated CO₂. *J. Exp. Bot.*, 45: 295–303.
- Nobel, P.S., Geller, G.N., Kee, S.C. & Zimmerman, A.D.** 1986. Temperatures and thermal tolerance for cacti exposed to high temperatures near the soil surface. *Plant Cell Env.*, 9: 279–287.
- Nobel, P.S., Russel, C.E., Felker, P., Medina, J.G. & Acunã, E.** 1987. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. *Agron. J.*, 79(3): 550–555.
- Nobel, P.S., Cavelier, J. & Andrade, J.L.** 1992. Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *J. Exp. Bot.*, 43(250): 641–648.
- Nobel, P.S., De la Barrera, E., Beilman, D.W., Doherty, J.H. & Zutta, B.R.** 2002. Temperature limitations for cultivation of edible cacti in California. *Madroño*, 49: 228–236.
- North, G.B. & Nobel, P.S.** 1992. Drought-induced changes in hydraulic conductivity and structure in roots of *Ferocactus acanthodes* and *Opuntia ficus-indica*. *New Phytol.*, 120: 9–19.
- North, G.B., Huang, B. & Nobel, P.S.** 1993. Changes in structure and hydraulic conductivity for root junctions of desert succulents as soil water status varies. *Bot. Acta*, 106: 126–135.
- North, G.B., Moore, T.L. & Nobel, P.S.** 1995. Cladode development for *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) under current and doubled CO₂ concentrations. *Am. J. Bot.*, 82: 159–166.
- Northcutt, G.** 2001. *Some downwind costs of upwind erosion* (available at http://72.3.251.71/EC/Editorial/Some_Downwind_Costs_of_Upwind_Erosion_4833.aspx).
- Novoa, S.** 2006. Sobre el origen de la tuna en el Perú. Algunos alcances. *Zonas Áridas*, 10: 174–181.
- Novoa, A., Le Roux, J.J., Robertson, M.P., Wilson, J.R.U. & Richardson, D.M.** 2014. Introduced and invasive cactus species: a global review. *AoB Plants*, 1–14.
- Novoa, A., Rodriguez, J., López Nogueira, A., Richardson, D.M. & González, L.** 2016. Seed characteristics in Cactaceae: useful diagnostic features for screening species for invasiveness. *S. Afr. J. Bot.*, 105: 61–65. DOI: 10.1016/j.sajb.2016.01.003.
- Obón, J., Castellar, M., Alacid, M. & Fernández López, J.** 2009. Production of a red-purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *J. Food Eng.*, 90: 471–479.
- Ochoa, M.J.** 2003. Cactus pear (*Opuntia* spp.) varieties: main characteristics in Republic Argentina. *Cactusnet Newsletter* (July 2003). 31 pp.
- Ochoa, M.J.** 2006. Manejo de los tunales hacia un sistema de aprovechamiento integral. Aprovechamiento integral de la tuna. *Cactusnet Newsletter*, 10 [Número Especial]: 64–72.
- Ochoa, J.** 2008. Cactus pear (*Opuntia* spp.) varieties: main characteristics of Republica Argentina. *Cactusnet Newsletter*, 8. 32 pp.
- Ochoa, M.J. & Uhart, S.A.** 2006a. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): I. Effects on cladode area and crop solar radiation interception. *Acta Hortic.*, 728: 117–123.
- Ochoa, M.J. & Uhart, S.A.** 2006b. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): II. Effects on solar radiation use efficiency and dry matter accumulation. *Acta Hortic.*, 728: 125–130.
- Ochoa, M.J. & Uhart, S.A.** 2006c. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): III. Effects on fruit yield and dry matter allocation to reproductive sinks. *Acta Hortic.*, 728: 131–136.
- Ochoa, M.J. & Uhart, S.A.** 2006d. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): IV. Effects on fruit quality. *Acta Hortic.*, 728: 137–144.
- Ochoa, M.J., Leguizamón, G. & Uhart, S.A.** 2002. Effects of nitrogen availability on cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) postharvest quality. *Acta Hortic.*, 581: 225–230.
- Ochoa, M.J., Targa, M.G., Abdala, G. & Leguizamón, G.** 2009. Extending fruiting season of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) in Santiago del Estero, Argentina. *Acta Hortic.*, 811: 87–90.

- Ochoa, M.J., Lobos, E., Portillo, L. & Viguera, A.L. 2015a. Importance of biotic factors and impact on cactus pear production system. *Acta Hortic.*, 1067: 327–334.
- Ochoa, M.J., Rivera, L.A., Arteaga Garibay, R.I., Martínez Peña, M.D., Ireta, J. & Portillo, L. 2015b. Black spot caused by *Pseudocercospora opuntiae* in cactus pear productive systems of Jalisco, Mexico. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 17: 1–12.
- Ochoa Velasco, C.E. & Guerrero Beltrán, J. . 2014. Postharvest quality of peeled prickly pear fruit treated with acetic acid and chitosan. *Postharvest Biol. Technol.*, 92: 139–145.
- ODEPA (Office of Agricultural Studies and Policies). 2015a. *Precios* (available at <http://www.odepa.cl/precios>).
- ODEPA. 2015b. *Comercio exterior* (available at <http://www.odepa.cl/estadisticas/comercio-exterior/>).
- ODEPA-CIREN (Natural Resources Centre). 2013. *Catastro de superficie frutícola regional: Maule* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- ODEPA-CIREN. 2014. *Catastro de superficie frutícola regional: Región Metropolitana* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- ODEPA-CIREN. 2015a. *Catastro de superficie frutícola regional: Atacama* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- ODEPA-CIREN. 2015b. *Catastro de superficie frutícola regional: Coquimbo* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- ODEPA-CIREN. 2015c. *Catastro de superficie frutícola regional: O'Higgins* (available at <http://www.odepa.cl/catastros-de-superficie-fruticola-regional/>).
- Odoux, E. & Domínguez López, A. 1996. Le figuier de barbarie: une source industrielle de betalaines? *Fruits*, 51(1): 61–78.
- Oelofse, R.M., Labuschagne, M. & Potgieter, J.P. 2006. Plant and fruit characteristics of cactus pear (*Opuntia* spp.) cultivars in South Africa. *J. Sci. Food Agric.*, 86: 1921–1925.
- OEP (Office of Livestock and Pasture). 2016. *Stratégie nationale d'amélioration pastorale*. Tunisia, Ministry of Agriculture.
- Oh, P.H. & Lim, K.T. 2006. Glycoprotein (90kCa) isolated from *Opuntia ficus-indica* var. Saboten Makino lowers plasma lipid level through scavenging of intracellular radicals in triton WR-1339-induced mice. *Biol. Pharm. Bull.*, 29: 1391–1396.
- Oliveira, E.P., Cavalcanti, V.A.L.B. & Coelho R.S.B. 2003. Ocorrência de *Macrophomina phaseolina* em palma forrageira no semiárido de Pernambuco. *Fitopatol. Bras.*, 26 [Suplemento]: 221.
- Oliveira, V.S., Ferreira, M.A., Guim, A., Modesto, E.C., Arnaud, B.L. & Silva, F.M. 2007. Effects of replacing corn and Tifton hay with forage cactus on milk production and composition of lactating dairy cows. *Rev. Bras. Zootec.*, 36(4): 928–935.
- Oliveri, C., Campisano, A., Catara, A. & Cirvilleri, G. 2007. Characterization and fAFLP genotyping of *Penicillium* strains from post-harvest samples and packinghouse environments. *J. Plant Pathol.*, 89: 29–40.
- Olson, J.C. & Jacoby, J. 1972. Cue utilization in the quality perception process. In M. Venkatesan, ed. Proceedings of the Third Annual Conference of the Association for Consumer Research, Chicago, pp. 167–179.
- Orona Castillo, I., Flores Hernández, A., Rivera González, M., Martínez, G. & Espinosa Arellano, J.J. 2003. Productividad del agua en el cultivo de nopal con riego por goteo en la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*, 21(2): 195–201.
- Osada, K.S. & Cárcamo, R.A. 1991. *Etiología de la mancha negra del nopal*. Memorias de Resúmenes, Congreso Nacional de Fitopatología. Sociedad Mexicana de Fitopatología, Mexico. 28 pp.
- Osmond, C.B., Nott, D.L. & Firth, P.M. 1979. Carbon assimilation patterns and growth of the introduced CAM plant *Opuntia inermis* in Eastern Australia. *Oecologia*, 40: 331–350.
- Osmond, B., Neales, T. & Stange, G. 2008. Curiosity and context revisited: crassulacean acid metabolism in the Anthropocene. *J. Exp. Bot.*, 59(7): 1489–1502.
- Otálora, M.C., Carriazo, J.G., Iturriaga, L., Nazareno, M.A. & Osorio, C. 2015. Microencapsulation of betalains obtained from cactus fruit (*Opuntia ficus-indica*) by spray drying using cactus cladode mucilage and maltodextrin as encapsulating agents. *Food Chem.*, 187: 174–181.
- Ouerghemmi, I., Bourgou, S., Mejri, H., Marzouk, B. & Saidini Tounsi, M. 2013. Study of essential and fixative oil chemical composition extracted from *Opuntia ficus-indica* seeds grown in Tunisia and its antioxidant activity. *Riv. Ital. Sostanze Grasse*, 90: 21–30.
- Ouled Belgacem, A. & Louhaichi, M. 2013. The vulnerability of native rangeland plant species to global climate change in the West Asia and North African regions. *Clim. Change*, 119: 451–463.
- Ovalle Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M. & Schroth, G. 2015. Projected shifts in *Coffea Arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS One*, 10: e0124155.
- Özcan, M. & Al Juhaimi, F. 2011. Nutritive value and chemical composition of prickly pear seed (*Opuntia ficus-indica* L.) growing in Turkey. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 62(5): 533–536.
- Padilla, F.M. & Pugnaire, F.I. 2006. The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Front Ecol. Environ.*, 4: 196–202.
- Palma, A., Schirra, M., D'Aquino, S., La Malfa, S. & Continella, A. 2015. Effect of edible coating on ascorbic acid, betalains, organic acids, sugar, polyphenol content and antioxidant activity in minimally processed cactus pears (*Opuntia ficus-indica*). *Acta Hortic.*, 1067: 127–133.
- Palomares Perez, M. 2011. *La chinche roja Hesperolobops nigriceps Reuter (Hemiptera: Miridae), y su relación con el "cacarizo del nopal", en Milpa Alta, Ciudad de México*. Montecillo, Texcoco, Mexico State, Postgraduate College (Doctorate thesis). 86 pp.
- Palomino, G. & Heras, H.M. 2001. Karyotypic studies in *Opuntia cochineria*, *O. hyptiacantha*, and *O. streptacantha* (Cactaceae). *Caryologia*, 54: 147–154.
- Pannitteri, C., Scuderi, G., Continella, A., La Malfa, S., D'Aquino, S. & Palma, A. 2015. Effectiveness of technological treatments for shelf-life extension of ready-to-eat cactus pear fruits. *Acta Hortic.*, 1067: 97–102.
- Pareek, O.P., Singh, R.S. & Vashishtha, B.B. 2003. Performance of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) clones in hot arid region of India. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 5: 121–130.
- Parish, J. & Felker, P. 1997. Fruit quality and production of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones selected for increased frost hardiness. *J. Arid Environ.*, 37: 123–143.
- Passioura, J.B. 1988. Water transport in and to roots. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 39: 245–256.
- Paterson, I.D., Hoffmann, J.H., Klein, H., Mathenge, C.W., Neso, S. & Zimmermann, H.G. 2011. Biological Control of Cactaceae in South Africa. *Afr. Entomol.*, 19(2): 230–246.
- Pemberton, R.W. 1995. *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera: Pyralidae) in the United States. An immigrant biological control agent or an introduction of the nursery industry? *Am. Entomol.*, 41: 230–232.
- Pensabén, E.M., Ramírez C., M.A. & Herrera, A. 1995. Efecto del tiempo de precocido y del tipo de solución empleada para la eliminación de las pectinas hidrosolubles contenidas en el nopal (*Opuntia leucotricha* De Candolle). In E. Pimienta Barrios, C. Neri Luna, A. Muñoz Urias & F.M. Huerta Martínez. *Conocimiento y aprovechamiento del nopal*, pp. 16–18. Memorias del 6to. Congreso Nacional y 4to. Congreso Internacional, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.
- Pérez, M.R., Rodríguez, M. & Martínez, M.C. 1999. Elaboración de vinagre de tuna amarilla "Naranjona o Pico Chulo". En Memoria VIII Congreso Nacional y VI Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 6–10 September, San Luis Potosí, Mexico, pp. 68–69.
- Petty, F.W. 1948. *The biological control of prickly pear in South Africa*. Science Bulletin No. 271. Department of Agriculture of the Union of South Africa. 163 pp.
- Pettinari, C. 1951. Una fusariosi su radici di *Opuntia ficus-indica*. *Boll. Stn. Patol. Veg.*, 61–67.
- Piga, A. 2004. Cactus Pear: A fruit of nutraceutical and functional importance. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 6: 9–22.
- Piga, A., D'Aquino, S., Agabbio, M. & Schirra, M. 1996. Storage life and quality attributes of cactus pears cv 'Gialla' as affected by packaging. *Agr. Med.*, 126: 423–427.
- Piga, A., D'Hallewin, G., D'Aquino, S. & Agabbio, M. 1997. Influence of film wrapping and UV irradiation on cactus pear quality after storage. *Packag. Technol. Sci.*, 10: 59–68.
- Piga, A., D'Aquino, S., Agabbio, M., Emonti, G. & Farris, G.A. 2000. Influence of storage temperature on shelf-life of minimally processed cactus pear fruit. *Lebensm.-Wiss. Technol.*, 33: 15–20.
- Pimentel González, D.J. 2013. Manejo poscosecha del nopal. In *Tecnología poscosecha y efectos biofuncionales del nopal y la tuna*, pp. 87–114. Mexico, Ed. Trillas.
- Pimienta Barrios, E. 1986. *Establecimiento y manejo de plantaciones de nopal tunero en Zacatecas*. Campo Agrícola Experimental Zacatecas Publicación Especial 5. INIFAP, SARH.
- Pimienta Barrios, E. 1990. *El nopal tunero*. Mexico, Universidad de Guadalajara. 246 pp.
- Pimienta Barrios, E. 1994. Prickly pear (*Opuntia* spp.): a valuable fruit crop for the semiarid lands of Mexico. *J. Arid Environ.*, 28: 1–11.
- Pimienta Barrios, E. & Engleman, E.M. 1985. Desarrollo de la pulpa y proporción, en volumen de los componentes del lóculo maduro en tuna (*Opuntia ficus indica* (L.) Miller). *Agrociencia*, 62: 51–56.
- Pimienta Barrios, E. & Mauricio, L. 1989. Variación en componentes del frutomaduro en transformas de nopal (*Opuntia* spp.) tunero. *Rev. Fitotec. Mex.*, 12: 183–196.

- Pimienta Barrios, E. & Munoz Urias, A.** 2002. Domestication of Opuntias and cultivated varieties. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 58–63. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Pimienta Barrios, E., Zañudo, J., Yezpe, E., Pimienta Barrios, E. & Nobel, P.S.** 2000. Seasonal variation of net CO₂ uptake for cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) in a semi-arid environment. *J. Arid Environ.*, 44: 73–83.
- Pimienta Barrios, E., Zañudo Hernández, J. & Nobel, P.S.** 2005. Effects of young cladodes on the gas exchange of basal cladodes of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae) under wet and dry conditions. *Int. J. Plant Sci.*, 166: 961–968.
- Pimienta Barrios, E., Castillo Cruz, I., Zañudo Hernández, J., Méndez Morán, L. & Nobel, P.S.** 2007. Effects of shade, drought and daughter cladodes on the CO₂ uptake by cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Ann. Appl. Biol.*, 151: 137–144.
- Piña, I.** 1977. *La grana o cochinilla del nopal*. Monografías LANFL. No. 1. Mexico, D.F. 54 pp.
- Piña, I. L.** 1981. Observaciones sobre la grana y sus nopales hospederos en el Perú. *Cact. Succulentas Mex.*, 26(1): 10–15.
- Pinkava, D.J.** 2002. Chromosome numbers of the continental North American Opuntioideae (Cactaceae). *Succ. Plant Res.*, 6: 78–98.
- Pinkava, D.J. & Parfitt, B.D.** 1982. Chromosome numbers in some cacti of North America IV. *Bull. Torrey Bot. Club*, 109: 121–128.
- Pinkava, D.J., McLeod, M.G., McGill, L.A. & Brown, R.C.** 1973. Chromosome numbers in some cacti of Western North America II. *Brittonia*, 25: 2–9.
- Pinkava, D.J., Baker, M.A., Parfitt, B.D., Mohlenbrock, M.W. & Worthington, R.D.** 1985. Chromosome numbers in some cacti of North America V. *Syst. Bot.*, 10: 471–483.
- Pinkava, D.J., Parfitt, B.D., Baker, M.A. & Worthington, R.D.** 1992. Chromosome numbers in some cacti of North America VI, with nomenclatural changes. *Madroño*, 39: 98–113.
- Pinos Rodríguez, J.M., Velázquez, J.C., González, S.S., Aguirre, J.R., García, J.C., Álvarez, G. & Jasso, Y.** 2010. Effects of cladode age on biomass yield and nutritional value of intensively produced spineless cactus for ruminants. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 40: 245–250.
- Pitalua, A., Jiménez, E., Vernon Carter, C. & Beristain, C.** 2010. Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. *Food Bioprod. Process.*, 88: 253–258.
- Pluenneke, R.H.** 1990. Prickly work at the R.W. Williams Ranch in Dimmit County Texas in the 1960s. In Proceedings of the First Annual Texas Prickly Pear Council, Kingsville, Texas, USA, pp. 22–26.
- Portillo, L.** 2005. Origen de *Dactylopius coccus* Costa (Hemiptera: Dactylopiidae): ¿Norte o Sudamérica? *Dugesiana*, 12: 1–8.
- Portillo, L.** 2009. Biogeography of Dactylopiidae and human factor. *Acta Hortic.*, 811: 235–240.
- Portillo, L. & Viguera, A.L.** 2003. *Cría de grana cochinilla*. Litográfica Montes. Mexico, University of Guadalajara. 51 pp.
- Portillo, L., Viguera, A.L. & Zamarripa, F.** 1992. El método Ricci: Una nueva técnica de infestación para la coccidocultura. En *Memorias de Resúmenes 5º Congreso Nacional y 3º Internacional Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*, Chapingo, Mexico, pp. 77–78.
- Potgieter, J.P.** 1997a. Seasonal guide for the cultivation of spineless cactus pear for fruit production. *Cactus Pear News*, Sept.: 4.
- Potgieter, J.P.** 1997b. Belangrike eienskappe van aanbevole turksvyvarieteite. *Cactus Pear News*, Nov.: 6–8.
- Potgieter, J.P.** 2001. *Guidelines for the cultivation of cactus pears for fruit production*. Fourth Revised Edition. Sinoville, South Africa, Group 7 Trust Printers. 16 pp.
- Potgieter, J.P.** 2007. *The influence of environmental factors on spineless cactus pear (Opuntia spp.) fruit yield in Limpopo Province, South Africa*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc thesis). 120 pp.
- Potgieter, J.P. & Mashope, B.K.** 2009. Cactus pear (*Opuntia* spp.) germplasm conservation in South Africa. *Acta Hortic.*, 811: 47–54.
- Potgieter, J.P. & Mkhari, J.J.** 2000. Effects of N,P,K and lime application on cactus pear (*Opuntia* spp.) fruit yield and quality under rain fed conditions in South Africa. Abstract Fourth International Congress on Cactus Pear and Cochineal, Hammamet, Tunisia. 37 pp.
- Potgieter, J.P. & Smith, M.** 2006. Genotype × environment interaction in cactus pear (*Opuntia* spp.), additive main effects and multiplicative interaction analysis for fruit yield. *Acta Hortic.*, 728: 97–104.
- Prakash, D. & Gupta, K.R.** 2009. The antioxidant phytochemicals of nutraceutical importance. *Open Nutraceuticals J.*, 2: 20–35.
- Pretorius, C.C., Rethman, N.F.G. & Wessels, A.B.** 1997. Invloed van besproeiingspeil op die opbrengs en voedingswaarde van die kultivars *Opuntia ficus-indica* as veevoer. *Appl. Plant Sci.*, 11: 53–55.
- Prieto, C., Sáenz, C., Silva, P. & Loyola, E.** 2009. Balsamic type vinegar from coloured ecotypes of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *Acta Hortic.*, 811: 123–126.
- Quezada Salinas, J., Sandoval Islas, S., Alvarado Rosales, D. & Cardenas Soriano, E.** 2006. Etiología de la mancha negra del nopal (*Opuntia ficus-indica* Mill) en Tlanepantla, Morelos, Mexico. *Agrociencia*, 40: 641–653.
- Quispe, L.** 1983. Métodos de infestación artificial de la cochinilla del carmin *Dactylopius coccus* Costa. En I Seminario Departamental de Producción y Fomento de la Tuna y Cochinilla. Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga, pp. 68–70.
- Al Qurashi, A.D. & Awad, M.A.** 2012. Postharvest salicylic acid treatment reduces chilling injury of 'Taify' cactus pear fruit during cold storage. *J. Food, Agric. Environ.*, 10: 120–124.
- Raabe, R.D. & Alcon, S.M.** 1968. Armillaria root and stem rot of prickly pear cactus. *Phytopathology*, 58: 1036–1037.
- Rai, P., Rai, C., Majumdar, G.C., Das Gupta, S. & De, S.** 2006. Resistance in series model for ultrafiltration of mosambi (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) juice in a stirred continuous mode. *J. Membrane Sci.*, 283: 116–122.
- Ramadan, M.F. & Mörsel, J.T.** 2003a. Oil cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.). *Food Chem.*, 83: 339–345.
- Ramadan, M.F. & Mörsel, J.T.** 2003b. Recovered lipids from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill] peel: a good source of polyunsaturated fatty acids, natural antioxidant vitamins and sterols. *Food Chem.*, 83: 447–456.
- Ramawat, K.G.** 2010. *Desert plants: Biology and biotechnology*. Dordrecht, Heidelberg, New York, London, Springer. 503 pp.
- Randall, R.P.** 2002. *Global compendium of weeds*. Melbourne (available at www.hear.org/gcw/index.html).
- Rao, V.P., Sankaran, M.A. & Mathur, K.C.** 1971. *A review of biological control of insects and other pests in South-East Asia and the Pacific Region*. Technical Communication No. 6, Slough, UK, CIBC. 149 pp.
- Rascher, U., Hütt, M.T., Siebke, K., Osmond, C.B., Beck, F. & Lüttge, U.** 2001. Spatio-temporal variation of metabolism in a plant circadian rhythm: the biological clock as an assembly of coupled individual oscillators. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 98: 11801–11805.
- Ratsele, C.** 2003. *Production evaluation of Opuntia robusta and O. ficus-indica cultivars in the central Free State*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc thesis). 110 pp.
- Raveh, E., Gersani, M. & Nobel, P.S.** 1995. CO₂ uptake and fluorescence responses for a shade-tolerant cactus *Hylocereus undatus* under current and doubled CO₂ concentrations. *Physiol. Plant.*, 93: 505–511.
- Raventós, M.** 2005. Tecnología de membranas. In *Industria alimentaria tecnologías emergentes*. Barcelona, Spain, Ediciones UPC.
- Rebman, J.P. & Pinkava, D.J.** 2001. Opuntia cacti in North America. *Fla. Entomol.*, 84: 474–483.
- Retamal, N., Durán, J.M. & Fernández, J.** 1987. Ethanol production by fermentation of fruits and cladodes of prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller). *J. Sci. Food Agric.*, 40: 213–218.
- Reveles Hernández, M., Flores Ortiz, M.A., Blanco Macías, F. & Valdez Cepeda, R.D.** 2010. El manejo del nopal forrajero en la producción de ganado bovino. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 5[ESP]: 130–144.
- Reyes Agüero, J.A. & Valiente Banuet, A.** 2006. Reproductive biology of Opuntia: a review. *J. Arid Environ.*, 64(4): 549–585.
- Reyes Agüero, A., Aguirre Rivera, R. & Carlin, F.** 2004. Análisis preliminar de la variación morfológica de 38 variantes mexicanas de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. In G. Esparza, R. Valdez & J.G. Méndez, eds. *El nopal, tópicos de actualidad*, pp. 21–47. México, Universidad Autónoma Chapingo, Colegio de Postgraduados.
- Reyes Agüero, J.A., Aguirre Rivera, J.R. & Hernández, H.M.** 2005. Systematic notes and a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). *Agrociencia*, 39: 395–408.
- Reyes Agüero, J.A., Aguirre Rivera, J.R. & Valiente Banuet, A.** 2006. Reproductive biology of Opuntia: a review. *J. Arid Environ.*, 64: 549–585.
- Reyes Agüero, J.A., Aguirre Rivera, J.R., Carlin Castelan, F. & González Durán, A.** 2009. *Catálogo de las principales variantes silvestres y cultivadas de Opuntia en la Altiplanicie Meridional de México*. Mexico, Autonomous University of San Luis Potosí, SAGARPA and CONACYT. 350 pp.
- Reyes Agüero, J.A., Aguirre Rivera, J.R. & Carlin Castelan, F.** 2013. Diversity of wild and cultivated *Opuntia* variants in the Meridional highlands plateau of Mexico. *Acta Hortic.*, 995: 69–74.
- Reynolds, S.G. & Arias, E.** 2001. Introduction. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 1–36. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, Italy. 146 pp.

- Ries, J.B. & Hirt, V. 2008. Permanence of soil surface crust on abandoned farmland in the central Ebro Basin/Spain. *Catena*, 72: 282–296.
- Robert, P., Torres, V., García, P., Vergara, C. & Sáenz, C. 2015. The encapsulation of purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) pulp by using polysaccharide-proteins as encapsulating agents. *LWT-Food Sci. Technol.*, 60(2):1039–1045.
- Robinson, H. 1974. Scanning electron microscope studies of the spines and glochids of the Opuntioideae (Cactaceae). *Am. J. Bot.*, 61: 278–283.
- Rocha, G.L. 1991. *Ecosistema de pastagens aspectos dinâmicos*. Piracicaba, Brazil, Luiz de Queiroz Agricultural Studies Foundation. 391 pp.
- Rodríguez, D. 1999. Desarrollo de una bebida pasteurizada a base de nopal. En Memoria VIII Congreso Nacional y VI Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, San Luis Potosí, Mexico, 6–10 September, pp. 75–76.
- Rodríguez, L.C. & Niemeyer, H.M. 2000. Evidencias indirectas sobre el origen de la cochinitilla, *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae). *Rev. Chilena Entomol.*, 27: 85–89.
- Rodríguez, I. & Portillo, L. 1989. Especies de *Opuntia* hospederas de *Dactylopius coccus* Costa. *Quepo*, 3: 49–53.
- Rodríguez, S.B., Perez, F.B. & Montenegro, D.D. 1975. *Eficiencia fotosintética del Nopal (Opuntia spp.) en relación con la orientación de sus cladodios*. Chapingo, Colegio de Postgraduados (Masters thesis).
- Rodríguez, L.C., Méndez, M.A. & Niemeyer, H.M. 2001. Direction of dispersion of cochineal (*Dactylopius coccus* Costa) within the Americas. *Am. Antiq.*, 75: 73–77.
- Rodríguez, S., Casóliba, R.M., Questa, A.G. & Felker, P. 2005. Hot water treatment to reduce chilling injury and fungal development and improve visual quality of two *Opuntia ficus-indica* fruit clones. *J. Arid Environ.*, 63: 366–378.
- Rodríguez Alvarado, G., Fernández Pavia, S.P. & Landa Hernández, L. 2001. First report of *Pythium aphanidermatum* causing crown and stem rot on *Opuntia ficus-indica*. *Plant Dis.*, 85: 231.
- Rodríguez Felix, A. 2002. Postharvest physiology and technology of cactus pear fruits and cactus leaves. *Acta Hortic.*, 581: 191–199.
- Rodríguez Felix, A., Gonzales Sales, H., Soto Valdez, H. & Silveira Gamont, I. 1992. Effect of postharvest treatments on the quality of tuna during storage. In Proceedings of the Third Annual Texas Prickly Pear Council, Kingsville, Texas, USA, pp. 9–12.
- Rodríguez García, C., de Lira, C., Hernández Becerra, E., Cornejo Villegas, M.A., Palacios Fonseca, A.J., Rojas Molina, I., Reynoso, R., Quintero, L.C., Del Real, A., Zepeda, T.A. & Muñoz Torres, C. 2007. Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus-indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 62: 107–112.
- Rodríguez González, S., Martínez Flores, H.E., Chavez Moreno, C.K., Macías Rodríguez, L.I., Zavala Mendoza, E., Garnica Romo, M.G. & Chacon García, L. 2014. Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. *J. Food Process Eng.*, 37: 285–292.
- Rodríguez Hernández, G.R., Gonzáles, R., Grajales, A. & Ruiz, M.A. 2005. Spray-drying of cactus pear juice (*Opuntia streptacantha*): Effect on the physicochemical properties of powder and reconstituted product. *Drying Technol.*, 23: 955–973.
- Rojas Graü, M.A., Garner, E. & Martin Belloso, O. 2011. The fresh-cut fruit and vegetables industry: Current situation and market trends. In O. Martin Belloso & R. Soliva Fortuny, eds. *Advances in fresh-cut fruits and vegetables processing*, p. 1–12. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Roos, Y.H. 2007. Water activity and glass transition. In G.V. Barbosa Cánovas, A.J. Fontana, Jr., S.J. Schmidt & T.P. Labuza, eds. *Water activity in foods: fundamentals and applications*. Ames, Iowa, USA, IFT Press and Blackwell Publishing.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C. & Pounds, J.A. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421: 57–60.
- Rosas, C.P. & Pimienta, B.E. 1986. Polinización y fase progámica en nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) tunero. *Fitotecnia*, 8: 164–176.
- Ruiz Moreno, A., ed. 1948. *La medicina en el Paraguay natural*. National University of Tucumán. 300 pp.
- Russell, C. & Felker, P. 1987a. Comparative freeze hardness of fruit vegetable and fodder *Opuntia* accessions. *J. Hortic. Sci.*, 62: 545–550.
- Russell, C.E. & Felker, P. 1987b. The prickly-pears (*Opuntia* spp., Cactaceae): a source of human and animal food in semiarid regions. *Econ. Bot.*, 41(3): 433–445.
- Rutam, I. 1999. Low cost biodigesters for zero grazing smallholder dairy farmers in Tanzania. *Livest. Res. Rural Dev.*, 11(2) (available at <http://www.lrrd.org/lrrd11/2/inno112.htm>). Accessed 10 November 2015.
- Saad, M., Degano, C. & Ochoa, J. 1998. Wet rot and necrosis caused by bacteria in *Opuntia ficus-indica* Mill in Santiago del Estero, Argentina. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 60–63.
- Sáenz, C. 1985. La tuna (*Opuntia ficus-indica*) un cultivo con perspectivas. *Alimentos*, 3: 47–49.
- Sáenz, C. 1999. Elaboración de alimentos y obtención de subproductos. In G. Barbera, P. Inglesse & E. Pimienta Barrios, eds. *Agroecología, cultivo y usos del nopal*, pp. 144–150. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Sáenz, C. 2000. Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp) fruits and cladodes. *J. Arid Environ.*, 46: 209–225.
- Sáenz, C. & Sepúlveda, E. 1999. Physical, chemical and sensory characteristics of juices from pomegranate and purple cactus pear fruit. In Annals 22nd IFU Symposium, 15–19 March, Paris, France, pp. 91–100.
- Sáenz, C. & Sepúlveda, E. 2001a. Cactus-pear juices. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 4: 3–10.
- Sáenz, C. & Sepúlveda, E. 2001b. Ecotipos Coloreados de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Aconex*, 72: 29–32.
- Sáenz, C., Corrales García, J. & Aquino Pérez, G. 2002a. Nopalitos, mucilage, fiber, and cochineal. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 211–234. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Sáenz, C., Estévez, A.M., Fontanot, M. & Pak, N. 2002b. Oatmeal cookies enriched with cactus pear flour as dietary fiber source: physical and chemical characteristics. *Acta Hortic.*, 581: 275–278.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Pak, N. & Vallejos, X. 2002c. Uso de fibra dietética de nopal en la formulación de un polvo para flan. *Arch. Latinoam. Nutr.*, 52(4): 87–92.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E. & Idalsoaga, M. 2002d. Color extract from purple cactus pear: preparation, characteristics and uses. *Cactusnet Newsletter*, 3–4.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E. & Vallejos, M.I. 2003. *Características sensoriales de un néctar de damasco elaborado con hidrocoloide de nopal*. Resúmenes. XIII Congreso Latinoamericano de Nutrición, 10–12 November, Acapulco, Mexico. 195 pp.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E. & Matsuhira, B. 2004. *Opuntia* spp. mucilage: a functional component with industrial perspectives. *J. Arid Environ.*, 57(3): 275–290.
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales García, J., Galletti, L., García del Cortazar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez Félix, A., Sepúlveda, E. & Varnero M.T., eds. 2006. *Utilización agroindustrial del nopal*. FAO Plant Production and Protection Paper No. 162. Rome, FAO. 165 pp.
- Sáenz, C., Tapia, S., Chávez, J. & Robert, P. 2009. Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chem.*, 114: 616–622.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., Pak N. & Lecaros, M. 2010. Chemical and physical characterization of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*) powder. *Ital. J. Food Sci.*, 22(4): 416–422.
- Sáenz, C., Yoong, M., Figuerola, F., Chiffelle, I. & Estévez, A.M. 2012a. Cactus pear cladodes powders as dietary fibre source: purification and properties. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 63(3): 283–289.
- Sáenz, C., Cancino, B. & Robert, P. 2012b. Red betalains from *Opuntia* spp.: natural colorants with potential applications in foods. *Isr. J. Plant Sci.*, 60: 291–299.
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales García, J., Galletti, L., García del Cortazar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez Félix, A., Sepúlveda, E. & Varnero, M.T. 2013. *Agro-industrial utilization of cactus pear*. Rural Infrastructure and Agro-Industries Division. Rome, FAO. 150 pp (available at <http://www.fao.org/docrep/019/a0534e/a0534e.pdf>).
- Sajeva, M. & Mauseth, J.D. 1991. Leaflike structure in the photosynthetic, succulent stems of cacti. *Ann. Bot.*, 68: 405–411.
- Salas, D. 2016. *Crianza de cochinitillas*. Proyectos Peruanos (available at <http://proyectosperuanos.com/2016/09/cochinitillas>). Accessed 18 December 2016.
- Samah, S., de Teodoro Pardo, C.V., Serrato Cruz, M.A. & Valadez Motezuma, E. 2015. Genetic diversity, genotype discrimination, and population structure of Mexican *Opuntia* sp., determined by SSR markers. *Plant Mol. Biol. Rep.*, DOI:10.1007/s1105-015-0908-4.
- El Samahy, S.K., Abd El Hady, E.A., Habiba, R.A. & Moussa Ayoub, T.E. 2007a. Cactus pear sheet and pasteurized and sterilized cactus pear juices. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 148–164.
- El Samahy, S.K., Abd El Hady, E.A., Habiba, R.A. & Moussa Ayoub, T.E. 2007b. Some functional, chemical, and sensory characteristics of cactus pear rice-based extrudates. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 136–147.
- El Samahy, S.K., Youssef, K.M. & Moussa Ayoub, T.E. 2009. Producing ice cream with concentrated cactus pear pulp: A preliminary study. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 11: 1–12.

- Samish, Y.B. & Ellern, S.J.** 1975. Titratable acids in *Opuntia ficus-indica* L. *J. Range Manage.*, 28: 365–369.
- Santibáñez, L.G.** 1990. *Ciclo biológico, cultivo y aprovechamiento de la cochinilla del nopal* *Dactylopius coccus* Costa en el municipio de Villa Díaz Ordaz, Tlaxcala, adscrito al centro Coordinador Indigenista (I.N.I.) Zapoteco del Valle Oaxaca. Reporte de Servicio Social. Mexico, Autonomous Metropolitan University. 149 pp.
- Santos, M.V.F. dos, Lira, M. de A., Farias, I., Burity, H.A., Nascimento, M.M.A. do & Tavares Filho, J.J.** 1990. Estudo comparativo das cultivares de palma forrageira "Gigante", "Redonda" (*Opuntia ficus-indica*, Mill) e "Miúda" (*Nopalea cochenillifera*, Salm Dyck) na produção de leite. *Rev. Soc. Bras. Zootec.*, 19(6): 504–511.
- Santos, D.C.S., Farias, I., Lira, M.A., Fernandes, A.P.M., Freitas, E.V. & Moreno, J.A.** 1996. Produção e composição química da palma forrageira cv. gigante (*Opuntia ficus-indica* Mill) sob adubação e calagem, no Agreste Semi-Árido de Pernambuco. *Pesqui. Agropecu. Pernambucana*, 9 [especial]: 69–78.
- Santos, D.C. dos, Santos, M.V.F. dos, Farias, I., Lira, M. de A., Dias, F.M. & Santos, V.F. dos.** 1998. Adensamento e frequências de cortes em cultivares de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*). Anais Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, Botucatu, SP, Brazil, pp. 512–514.
- Santos, D.C. dos, Lira, M. de A., Dias, F.M., Farias, I., Santos, M.V.F. dos & Santos, V.F. dos.** 2000. Produtividade de cultivares de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*). Simpósio Nordeste de Alimentação de Ruminantes, SNPA, Teresina, Recife, Brazil, pp. 121–123.
- Santos, J.R.S., Cezar, M.F., Sousa, W.H., Cunha, M.G.G., Filho, J.M.P. & Sousa, D.O.** 2011. Muscularity and adiposity of carcass of Santa Inês lambs: Effects of different levels of replacement of ground corn by forage cactus meal in finishing ration. *Rev. Bras. Zootec.*, 40: 2267–2272.
- Saraiva, F.M.** 2014. *Desenvolvimento e acúmulo de nutrientes de palma forrageira (Nopalea) em diferentes sistemas de cultivo*. Recife, Brazil, Animal Science Graduate Program, Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE) (PhD Dissertation). 125 pp.
- Sarkar, P., Setia, N. & Choudhury, G.S.** 2011. Extrusion processing of cactus pear. *Adv. J. Food Sci. Technol.*, 3(2): 102–110.
- Sawaya, W.N. & Khan, P.** 1982. Chemical characterization of prickly pear seed oil, *Opuntia ficus indica*. *J. Food Sci.*, 47: 2060–2061.
- Sawaya, W.N., Khatchadourian, H.A., Safi, W.M. & Al Hammad, H.M.** 1983. Chemical characterization of prickly pear pulp, *Opuntia ficus-indica*, and the manufacturing of prickly pear jam. *J. Food Technol.*, 18: 183–193.
- Sawyer, J.E., Knox, L.A., Donart, G.B. & Petersen, M.K.** 2001. The nutritive quality of cholla cactus as affected by burning. *J. Range Manage.*, 54(3): 249–253.
- Scalisi, A., Morandi, B., Inglese, P. & Lo Bianco, R.** 2015. Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. *Environ. Exp. Bot.*, 122: 158–167.
- Scheinvar, L.** 1995. Taxonomy of utilized *Opuntias*. In G. Barbera, P. Inglese & B.E. Pimental, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 20–27. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Scheinvar, L., Gallegos, C., Olalde, G. & Rodriguez, A.** 2010. *Opuntia* ser. *Streptacanthae* (Cactaceae) – neotypifications and taxonomic notes for four species. *Schumannia*, 6: 277–296.
- Schelle, E.** 1907. *Kakteen*. Tübingen, Germany, A. Fischer.
- Scherm, B., Ortu, G., Muzzu, A., Budroni, M., Arras, G. & Migheli, Q.** 2003. Biocontrol activity of antagonistic yeasts against *Penicillium expansum* on apple. *J. Plant Pathol.*, 85: 205–213.
- Schirra, M., Barbera, G., D'Aquino, S., La Mantia, T. & McDonald, R.E.** 1996. Hot dips and high-temperature conditioning to improve shelf quality of late-crop cactus pear fruit. *Trop. Sci.*, 36: 159–165.
- Schirra, M., Agabbio, M., D'Aquino, S. & McCollum, T.G.** 1997. Postharvest heat conditioning effects on early ripening 'Gialla' cactus pear fruit. *HortScience*, 32: 702–704.
- Schirra, M., D'Hallewin, G., Inglese, P. & La Mantia, T.** 1999a. Epicuticular changes and storage potential of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) fruit following gibberellic acid preharvest sprays and postharvest heat treatments. *Postharvest Biol. Technol.*, 17: 79–88.
- Schirra, M., Inglese, P. & La Mantia, T.** 1999b. Quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) fruit in relation to ripening time, CaCl₂ preharvest sprays and storage conditions. *Sci. Hortic. (Amsterdam, Neth.)*, 81: 425–436.
- Schirra, M., Brandolini, V., Cabras, P., Angioni, A. & Inglese, P.** 2002. Thiabendazole uptake and storage performance of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cv 'Gialla') fruit following postharvest treatments with reduced doses of fungicide at 52 °C. *J. Agric. Food Chem.*, 50: 739–743.
- Segura, S., Scheinvar, L., Olalde, G., Leblanc, O., Filardo, S., Muratalla, A., Gallegos, C. & Flores, C.** 2007. Genome sizes and ploidy levels in Mexican cactus pear species *Opuntia* (Tourn.) Mill. series *Streptacanthae* Britton et Rose, *Leucotrichae* DC., *Heliabravoanae* Scheinvar and *Robustae* Britton et Rose. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 54: 1033–1041.
- Sepúlveda, E. & Sáenz, C.** 1988. Industrialización de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). I. Aceite de la semilla. *Alimentos*, 13: 35–38.
- Sepúlveda, E. & Sáenz, C.** 1990. Chemical and physical characteristics of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) pulp. *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.*, 30(4): 551–555.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Alvarez, M.** 2000. Physical, chemical and sensory characteristics of dried fruit sheets: cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) and quince (*Cydonia oblonga* Mill). *Ital. J. Food Sci.*, 12(1): 47–54.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Rojas, A.** 2002. Comparación de un extracto colorante de tuna púrpura (*Opuntia ficus-indica* L.) y un colorante comercial de betarraga en yoghurt. Resúmenes XII Seminario de Ciencia y Tecnología de Alimentos de América Latina y el Caribe, 23–26 July, Asunción, Paraguay.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Vallejos, M.I.** 2003a. Comportamiento reológico de néctar elaborado con hidrocoloide de nopal: efecto del tratamiento térmico. En Memorias IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 2–6 September, Zacatecas, Mexico, pp. 269–272.
- Sepúlveda, E., Abraján, M. & Sáenz, C.** 2003b. Estudios preliminares de elaboración de láminas deshidratadas de ecotipos coloreados de tuna. En Memorias IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 2–6 September, Zacatecas, Mexico, pp. 278–281.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Gómez, C.** 2003c. Determinación de betanina en ecotipos de tuna roja colectados en Chile. En Memorias IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, 2–6 September, Zacatecas, Mexico, pp. 282–285.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. & Vallejos, M.I.** 2004. Efecto del almacenamiento en las propiedades reológicas y sensoriales de néctar de damasco formulado con hidrocoloide de nopal (*Opuntia ficus-indica*). Resúmenes XIII Seminario Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 12–16 October, Montevideo, Uruguay.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga E. & Aceituno, C.** 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *J. Arid Environ.*, 68: 534–545.
- Serrano, A., Sousa, M., Hallett, J., Lopes, J.A. & Oliveira, M.C.** 2011. Analysis of natural red dyes (cochineal) in textiles of historical importance using HPLC and multivariate data analysis. *Anal. Bioanal. Chem.*, 401: 735–743.
- Serrano, A., Sousa, M., Hallett, J., Simmonds, M.S.J., Nesbitt, M. & Lopes, J.A.** 2013. Identification of *Dactylopius* cochineal species with high-performance liquid chromatography and multivariate data analysis. *Analyst*, 138: 6081–6090.
- Shideed, K., Alary, V., Laamari, A., Nefzaoui, A. & El Mourid, M.** 2007. Ex post impact assessment of natural resource management technologies in crop-livestock systems in dry areas of Morocco and Tunisia. In H. Waibel & D. Zilberman, eds. *International research on natural resource management*, pp. 169–195. CAB International.
- Shine, C., Williams, N. & Gündling, L.** 2000. *A guide to designing legal and institutional frameworks on alien invasive species*. Gland, Switzerland, Cambridge, Bonn, International Union for Conservation of Nature (IUCN). 138 pp.
- Short, H.L.** 1979. *Food habits of Coyotes in a semi desert grass-shrub habitat*. Research Note, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Forest Service, USDA. 4 pp.
- Shumye, G., Woldetsadik, K. & Fitiwi, I.** 2014. Effect of integrated postharvest handling practices on quality and shelf-life of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) fruits. *J. Postharv. Tech.*, 2: 68–79.
- SIAP (Agricultural and Fishery Information System).** 2014. *Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, Mexico* (available at www.siap.gob.mx).
- SIAP.** 2015. *Servicio de información agroalimentaria y pesquera*. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (available at <http://www.siap.gob.mx>). Accessed 19 August 2015.
- Silva, N.G.M.** 2012. *Produtividade, morfometria e acúmulo de nutrientes da palma forrageira sob doses de adubação orgânica e densidades de plantio*. Recife, Brazil, Animal Science, Federal Rural University of Pernambuco (PhD dissertation). 97 pp.
- Singh, G.** 2003. General review of *Opuntias* in India. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 5: 30–46.
- Singh, G.** 2006. An overview of cactus pear research and development in India. *Acta Hortic.*, 728: 43–48.

- Singh, R.S. & Singh, V.** 2003. Growth and development influenced by size, age and planting methods of cladodes in cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 5: 47–54.
- Singh, S., Gamlath, S. & Wakeling, L.** 2007. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 42: 916–929.
- Siriwardhana, N., Shahidi, F. & Jeon, Y.J.** 2006. Potential antioxidative effects of cactus pear fruit (*Opuntia ficus-indica*) extract on radical scavenging and DNA damage reduction in human peripheral lymphocytes. *J. Food Lipids*, 13: 445–458.
- Smith, M.** 2005. Kies regte turksky kultivar. *Landbouweekblad*, 29 July: 8–9.
- Smith, H.M. & Samach, A.** 2013. Constraints to obtaining consistent annual yields in perennial tree crops. I: Heavy fruit load dominates over vegetative growth. *Plant Sci.*, 207: 158–167.
- Smith, S.D., Tissue, D.T., Huxman, T.E. & Loik, M.E.** 2009. Ecophysiological responses of desert plants to elevated CO₂: environmental determinants and case studies. In E. De la Barrera & W. Smith, eds. *Perspectives in biophysical plant ecophysiology: A tribute to Park S. Nobel*, pp. 363–390. Mexico City, UNAM.
- Smith, G.F., Figueiredo, E., Boatwright, J.S. & Crouch, N.R.** 2011. South Africa's ongoing *Opuntia* Mill. (Cactaceae) problem: the case of *Opuntia microdasys* (Lehm.) Pfeiff. *Bradleya*, 29: 73–78.
- Snoussi Trifa, H., Labra, M. & Ben Salem, H.** 2009. Molecular characterization of three Tunisian collections of cactus. *Acta Hort.*, 811: 287–291.
- Snyman, H.A.** 2004. Effect of various water applications on root development of *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* under greenhouse growth conditions. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 6: 35–61.
- Snyman, H.A.** 2005. A case study on *in situ* rooting profiles and water-use efficiency of cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 7: 1–21.
- Snyman, H.A.** 2006a. Root distribution with changes in distance and depth of two-year-old cactus pear *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* plants. *S. Afr. J. Bot.*, 72: 434–441.
- Snyman, H.A.** 2006b. A greenhouse study on root dynamics of cactus pear, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *J. Arid Environ.*, 65: 529–542.
- Soberón, J., Golubov, J. & Sarukhán, J.** 2001. The importance of *Opuntia* in Mexico and routes of invasion and impact of *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera: Pyralidae). *Fla. Entomol.*, 84: 486–492.
- Somma, V., Rosciglione, B. & Martelli G.P.** 1973. Preliminary observations on gummosis canker, a new disease of prickly pear. *Tec. Agric.*, 25: 437–443.
- Sosa, R. & Acosta, A.** 1966. Poliploidia en *Opuntia* spp. *Agrociencia*, 1: 100–106.
- Souto Alves, T., Vanusa da Silva, M., Alves de Almeida, C.M., Oliveira Jordão do Amaral, D., Cordeiro dos Santos, D., Farias, I., Tenório Sabino Donato, V.M. & Da Costa, A.F.** 2009. Genetic diversity in cactus clones using ISSR markers. *Acta Hort.*, 811: 55–58.
- Souza, T.C. de.** 2015. *Sistemas de cultivo para a palma forrageira cv. Miúda* (Nopalea cocheniliifera *Salm Dyck*). Recife, Brazil, Animal Science, Federal Rural University of Pernambuco (PhD Dissertation). 74 pp.
- Souza, E.J., Guim, A., Batista, A.M.V., Santos, K.L., Silva, J.R., Morais, N.A.P. & Mustafa, A.F.** 2009. Effects of soybean hulls inclusion on intake, total tract nutrient utilization and ruminal fermentation of goats fed spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* Mill.) based diets. *Small Ruminant Res.*, 85: 63–69.
- Souza, A.E.F., Nascimento, L.C., Araújo, E., Lopes, E.B. & Souto, F.M.** 2010. Ocorrência e identificação dos agentes etiológicos de doenças em palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill.) no semiárido paraibano. *Biotemas*, 23: 11–20.
- Spencer, J.L.** 1955. A cytological study of the Cactaceae of Puerto Rico. *Bot. Gaz.*, 117: 33–37.
- Spodek, M., Ben Dov, Y., Protasov, A., Carvalho, C.J. & Mendel, Z.** 2014. First record of *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (Hemiptera: Coccoidea: Dactylopiidae) from Israel. *Phytoparasitica*, 43: 377–379.
- Srekanth, D., Arunasree, M.K., Roy, K.R., Chandramohan Reddy, T., Reddy, G.V. & Reddanna, P.** 2007. Betanin a betacyanin pigment purified from fruits of *Opuntia ficus-indica* induces apoptosis in human chronic myeloid leukemia Cell line-K562. *Phyto-medicine*, 14: 739–746.
- Srikanth, K. & Whang, S.S.** 2015. Phylogeny of Korean *Opuntia* spp. based on multiple DNA regions. *Turk. J. Bot.*, 39: 635–641.
- Stassen, P.J.C. & Davie, S.J.** 1996. *Planting and training systems for citrus and subtropical fruit trees*. ARC-ITSC Information Bulletin No. 285, pp. 10–19.
- Stassen, P.J.C., Davie, S.J. & Snijder, B.** 1995. Principles involved in tree management of higher density avocado orchards. *S. Afr. Avoc. Grow. Assoc. Yearb.*, 18: 47–50.
- Stintzing F.C. & Carle, R.** 2005. Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Mol. Nutr. Food Res.*, 49: 175–194.
- Stintzing, F.C., Schieber, A. & Carle, R.** 2001. Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *Eur. Food Res. Technol.*, 212: 396–407.
- Stintzing, F.C., Herbach, K.M., Mosshammer, M.R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C.C., Bunch, R. & Felker, P.** 2005. Color, betalain pattern and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *J. Agric. Food Chem.*, 53: 442–451.
- Stockwell, P.** 1935. Chromosome numbers of some of the Cactaceae. *Bot. Gaz.*, 96: 565–570.
- Suaste Dzul, A., Rojas Martínez, R.I., Ochoa Martínez, D., Zavaleta Mejía, E., Pérez Brito, D., Hernández Juárez, C. & Rodríguez Martínez, D.** 2012a. Virus associated with thickening of the cladodes of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *J. Biotechnol. Biodiversity*, 3: 100–107.
- Suaste Dzul, A., Rojas Martínez, R.I., Zavaleta, M.E. & Pérez, B.D.** 2012b. Detección molecular de fitoplasmas en nopal tunero (*Opuntia ficus-indica*) con síntomas de engrosamiento del cladodio. *Rev. Mex. Fitopatol.*, 30: 72–80.
- Sudzuki Hills, F.** 1995. Anatomy and morphology. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimentia Barrios, eds. *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, pp. 28–35. FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Sudzuki Hills, F., Muñoz, C. & Berger, H.** 1993. *El cultivo de la tuna (cactus pear)*. First Edition. Faculty of Agronomic Science, Department of Agricultural Production, University of Chile. 88 pp.
- Sulé, M.A., Paquin, J.P. & Lévy, J.P.** 2002. Modelling perceived quality in fruit products: their extrinsic and intrinsic attributes. *J. Food Prod. Mark.*, 8(1): 29–48.
- Sumaya Martínez, M.T., Cruz Jaime, S., Marigal Santillán, E., García Paredes, J.D., Cariño Cortés, R., Cruz Cansino, N., Valadez Vega, C., Martínez Cardenas, L. & Alanis García, E.** 2011. Betalain, acid ascorbic, phenolic contents and antioxidant properties of purple, red, yellow and white cactus pears. *Int. J. Mol. Sci.*, 12: 6452–6468.
- Swart, W.J.** 2009. Strategies for the management of cactus pear diseases: A global perspective. *Acta Hort.*, 811: 207–216.
- Swart, W.J. & Kriel, W.M.** 2002. Pathogens associated with necrosis of cactus pear cladodes in South Africa. *Plant Dis.*, 86: 693–693.
- Swart, W.J. & Swart, V.R.** 2002. The current status of research on diseases of *Opuntia ficus-indica* in South Africa. *Acta Hort.*, 581: 239–245.
- Swart, W.J., Oelofse, R.M. & Labuschagne, M.T.** 2003. Susceptibility of South African cactus pear varieties to four fungi commonly associated with disease symptoms. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 86–97.
- Tafoya, F.** 2006. Manejo del picudo del nopal, *Metamasius spinolae* (Coleoptera: Curculionidae) con feromonas. In J.F. Barrera & P. Monoya, eds. *Simposio sobre Trampas y Atrayentes en Detección, Monitoreo y Control de Plagas de Importancia Económica*, Colima, Mexico, Sociedad Mexicana de Entomología y El Colegio de la Frontera Sur Manzanillo, pp. 27–34.
- Tagliavini, M., Panzacchi, P., Ceccon, C., Liguori, G., Bertolla, C., Meggio, F., Tonon, G., Corelli Grappadelli, L., Celano, G., Gucci, R., Pitacco, A. & Inglese, P.** 2008. Fluxes of carbon in Italian orchards. In Abstracts of the 1st Symposium on Horticulture in Europe, Vienna. 90 pp.
- Tangiorgi Tomasi L. & Tosi, A.** 1990. *Flora e pomona. L'orticoltura nei disegni e nelle incisioni dei secoli XIV–XIX*. Florence, Italy, Leo S. Olschki Ed.
- Tapia, C.C.** 1983. *Cultivo da palma forrageira e figo da índia*. Boletim técnico 141. EMPARN. 41 pp.
- Targa, M.G., Leguizamón, G., Coronel de Renolfi, M. & Ochoa, M.J.** 2013. Economic feasibility of *scozzolatura* in traditional and improved orchards of cactus pear in Santiago del Estero, Argentina. *Acta Hort.*, 995: 189–200.
- Tegegne, F.** 2001. Nutritional value of *Opuntia ficus-indica* as ruminant feed in Ethiopia. In C. Mondragón Jacobo & S. Pérez González, eds. *Cactus (Opuntia spp.) as forage*, pp. 91–99. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Rome, FAO.
- Tegegne, F., Kijora, C. & Peters, K.J.** 2007. Study on the optimal level of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) supplementation to sheep and its contribution as source of water. *Small Ruminant Res.*, 72: 157–164.
- Téllez, O.** 1911. La cochinilla o grana. *Bol. Dir. Gen. Agric. Mex.*, 3: 244–255.
- Terrazas Salgado, T. & Arias, S.** 2003. Comparative stem anatomy in the subfamily Cactaceae. *Bot. Rev.*, 68: 444–473.
- Terrazas Salgado, T. & Mauseth, J.D.** 2002. Shoot anatomy and morphology. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 23–40. Berkeley, CA, USA, University of California Press.

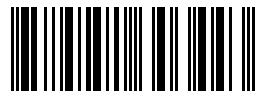
- Terrazas Salgado, T., Loza Cornejo, S. & Arreola Nava, H.J.** 2005. Anatomía caulinar de las especies del género *Stenocereus* (Cactaceae). *Acta Bot. Venez.*, 28: 321–336.
- Tesoriere, L., Butera, D.L., D'Arpa, D., Di Gaudio, F., Allegra, M., Gentile C. & Livrea M.A.** 2003. Increased resistance to oxidation of betalain-enriched human low density lipoproteins. *Free Radical Res.*, 37: 689–696.
- Tesoriere, L., Butera, D., Pintauidi, A.M., Allegra, M. & Livrea, M.A.** 2004. Supplementation with cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit decreases oxidative stress in healthy humans: a comparative study with vitamin C. *Am. J. Clin. Nutr.*, 80: 391–395.
- Tesoriere, L., Butera, D., Allegra, M., Fazzari, M. & Livrea, M.A.** 2005a. Distribution of betalain pigments in red blood cells after consumption of cactus pear fruits and increased resistance of the cells to ex vivo induced oxidative hemolysis in humans. *J. Agric. Food Chem.*, 53: 1266–1270.
- Tesoriere, L., Fazzari, M., Allegra, M. & Livrea, M.A.** 2005b. Biothiols, taurine, and lipid-soluble antioxidants in the edible pulp of Sicilian cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits and changes of bioactive juice components upon industrial processing. *J. Agric. Food Chem.*, 53: 7851–7855.
- Tessitori, M., Masenga, V. & Marzachi, C.** 2006. First report of a phytoplasma associated with abnormal proliferation of cladodes in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in Italy. *Plant Pathol.*, 55: 292.
- Testoni, A. & Echer Zerbin, P.** 1990. Conservazione del fico d'India in atmosfera normale e controllata. *Ann. Ist. Sper. Valorizzazione Tecnol. Prod. Agric.*, 21: 131–139.
- Timpanaro, G., Urso, A., Spampinato, D. & Foti, V.T.** 2015a. Fresh-cut cactus pear market in Italy: Current scenario and future perspectives. *Acta Hortic.*, 1067: 399–406.
- Timpanaro, G., Urso, A., Spampinato, D. & Foti, V.T.** 2015b. Cactus pear market in Italy: Competitiveness and perspectives. In Proceedings of the VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal. *Acta Hortic.*, 1067: 407–415.
- Tlili, N., Bargougui, A., Elfalleh, W., Triki, A. & Nasri, N.** 2011. Phenolic compounds, protein, lipid content and fatty acids compositions of cactus seeds. *J. Med. Plants Res.*, 5(18): 4519–4524.
- Todisco, S., Tallarico, P. & Gupta, B.** 2002. Mass transfer and polyphenols retention in the clarification of black tea with ceramic membranes. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 3: 255–262.
- Tohá, J.** 1999. La tuna como fuente de energía. *Rev. Bioplanet.* Santiago, Chile.
- Torres Sales, T.A.** 2010. Sistemas de producción de nopal forrajero en Brasil. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 5 [Edición Especial]: 57–69.
- Trachtenberg, S. & Mayer, A.M.** 1981. Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochem.*, 20(12): 2665–2668.
- Trejo Gonzalez, A., Gabriel Ortiz, G., Puebla Perez, A.M., Huizar Contreras, M.D., Mungia Mazariegos, M.R., Mejia Arreguin, S. & Calva, E.** 1996. A purified extract from prickly pear cactus (*Opuntia filiginosa*) controls experimentally induced diabetes in rats. *J. Ethnopharmacol.*, 55: 27–33.
- Trentacoste, E.R., Connor, D.J. & Gomez del Campo, M.** 2015. Row orientation: applications to productivity and design of hedgerows in horticultural and olive orchards. *Sci. Hortic.*, 187: 15–29.
- Tsuda, S., Murakami, M., Kano, K., Taniguchi, K. & Sasaki, Y.F.** 2001. DNA damage induced by red food dyes orally administered to pregnant and male mice. *Toxicol. Sci.*, 61(1): 92–99.
- Tudisca, S., Di Trapani, A.M., Sgroi, F. & Testa, R.** 2015. Costs, revenues and income of Sicilian farms that cultivate cactus pear. *Acta Hortic.*, 1067: 371–377.
- Tukuypaj.** 1993. *Experiencias en la cría de la cochinilla del carmín en Cochabamba, Bolivia.* 53 pp.
- Turpin, H.W. & Gill, G.A.** 1928. *Versekering teen droogte: teen-droogte-bestande voersoorte met speciale verwyssing na turksvy.* Pamphlet No. 36. Department of Agriculture, Union of South Africa. Pretoria, Government Printer. 64 pp.
- UN-DESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs).** 2015. *World population prospects. Key findings and advance tables* (available at https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf).
- University of California Cooperative Extension. UC Small Farm Program.** 1989. *Prickly pear cactus production* (available at <http://sfpc.ucdavis.edu/pubs/brochures/Pricklypear/>).
- UNSO/UNDP (Office to Combat Desertification and Drought/United Nations Development Programme).** 1997. *Drought preparedness and management for western African countries.*
- Unterperntinger, T.** 2006. Commercial cactus pear production in South Africa: a farmer's perspective. Abstract in Proceedings of the 2006 International Cactus Pear Conference, 29–31 March 2006, Bloemfontein, South Africa, p. 5.
- Uribe, J., Varnero, M.T. & Benavides, C.** 1992. Biomasa de tuna (*Opuntia ficus-indica* L. Mill) como acelerador de la digestión anaeróbica de guano de bovino. *Simiente*, 62(1): 14–18.
- Valadez Moctezuma, E., Ortiz Vásquez, Q. & Samah, S.** 2014. Molecular based assessment of genetic diversity of xocostle accessions (*Opuntia* spp.). *Afr. J. Biotechnol.*, 13: 202–210.
- Valadez Moctezuma, E., Samah, S. & Luna Paez, A.** 2015. Genetic diversity of *Opuntia* spp. varieties assessed by classical marker tools (RAPD and ISSR). *Plant Syst. Evol.*, 301: 737–747.
- Valdez Cepeda, R.D., Blanco Macías, F., Magallanes Quintanar, R., Vázquez Alvarado, R.E. & Reveles Hernández, M.** 2009. Avances en la nutrición del nopal en México. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 5 [Edición Especial]: 1–14.
- Valdez Cepeda, R.D., Blanco Macías, F., Magallanes Quintanar, R., Vasquez Alvarado, R. & Mendez Gallegos, S. de Jesus.** 2013. Fruit weight and number of fruits per cladode depend on fruiting cladode fresh and dry weight in *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety 'Rojo pelon'. *Sci. Hortic.*, 161: 165–169.
- Van Dam, A. & May, B.** 2012. A new species of *Dactylopius* Costa (*Dactylopius gracilipilus* sp. Nov.) (Hemiptera: Coccoidea: Dactylopiidae) from the Chihuahuan Desert, Texas, U.S.A. *Zootaxa*, 3573: 33–39.
- Van Dam, A., Portillo, L., Jeri, A. & May, B.** 2015. Range wide phylogeography of *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 108: 299–310.
- Van Der Merwe, L.L., Wessels, A.B. & Ferreira, D. I.** 1997. Supplementary irrigation for spineless cactus pear. *Acta Hortic.*, 438: 77–82.
- Vardi, A., Levin, I. & Carmi, N.** 2008. Induction of seedlessness in *Citrus*: from classical techniques to emerging biotechnological approaches. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 133(1): 117–126.
- Vargas, G. & Flores, V.** 1986. Frecuencia de oviposición de la "cochinilla del carmín" *Dactylopius coccus* Costa en condiciones de laboratorio. En Resúmenes del Primer Congreso Nacional de Tuna y Cochinilla, Ayacucho, Peru, pp. 40–41
- Varnero, M.T.** 1991. *Manual de reciclaje orgánico y biogás.* Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura (FIA), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 48 pp.
- Varnero, M.T.** 2001. Sistemas de reciclaje de residuos sólidos orgánicos: biodigestores. *Rev. Chile Agric.*, 26(250): 132–135.
- Varnero, M.T. & Arellano, J.** 1991. *Aprovechamiento racional de desechos orgánicos.* Informe Técnico. Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura (FIA), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 98 pp.
- Varnero, M.T. & García de Cortázar, V.** 1998. Energy and biofertilizer production: alternative uses for pruning-waste of cactus-pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill). In Proceedings of the International Symposium on Cactus Pear and Nopalitos Processing and Uses, 24–26 September 1998, Santiago, Chile, pp. 96–102. Faculty of Agrarian and Forest Sciences, University of Chile, CactusNet.
- Varnero, M.T. & García de Cortázar, V.** 2006. Producción de bioenergía y fertilizantes a partir de los nopales. In C. Sáenz, ed. *Utilización agroindustrial del nopal*, pp. 113–120. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO No. 162. Rome, FAO.
- Varnero, M.T. & García de Cortázar, V.** 2013. Production of bioenergy and fertilizers from cactus cladodes. In C. Sáenz, ed. *Agro-industrial utilization of cactus pear*, pp. 103–109. Rural Infrastructure and Agro-Industries Division. Rome, FAO. 150 pp.
- Varnero, M.T. & López, X.** 1996. Efecto del tamaño y edad de cladodios de tuna en la fermentación metanogénica de guano de bovino. Boletín No. 11, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, pp. 80–89.
- Varnero, M.T., Uribe, J.M. & López, X.** 1992. Factibilidad de una biodigestión anaeróbica con mezclas de guano caprino y cladodios de tuna (*Opuntia ficus-indica* L. Mill). *Terra Aridae*, 11: 166–172.
- Varvaro, L., Granata, G. & Balestra, G.M.** 1993. Severe *Erwinia* caused damage on *Opuntia ficus-indica* in Italy. *J. Phytopathol.*, 138: 325–330.
- Vasconcelos, A.G.V. de Lira, M.A., Cavalcanti, V.L.B., dos Santos, M.V.F. & Willadino, L.** 2009. Selection of pickly-pear clones resistant to carmine cochineal *Dactylopius* sp. *Rev. Bras. Zootec.*, 38(5): 827–831.
- Vásquez Alvarado, R.E., Olivares Saenz, E., Zavala García, F. & Valdez Cepeda, R.D.** 2006. Utilisation of manure and fertilisers to improve the productivity of cactus pear. *Acta Hortic.*, 728: 151–158.
- Vásquez Alvarado, R., Valdez Cepeda, R.D. & Blanco Macías, F.** 2009. Riego y fertilización del nopal verdura. *Rev. Salud Pública Nutr.*, 2[Edición Especial]: 19–35.
- Vásquez Méndez, R., Ventura Ramos, E., Oleschko, K., Hernández Sandoval, L. & Domínguez Cortázar, M.A.** 2011. Soil erosion processes in semiarid areas: The importance of native vegetation. In *Soil erosion studies*. InTech. 332 pp.

- Veras, R.M.L., De Andrade Ferreira, M., Ramos De Carvalho, F.F. & Chaves Vêras, A.S. 2002. Farelo de Palma Forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill) em Substituição ao Milho. 1. Digestibilidade Aparente de Nutrientes. *Rev. Bras. Zootec.*, 31(3): 1302–1306.
- Veras, R.M.L., De Andrade Ferreira, M., De Araújo Cavalcanti, C.V., Chaves Vêras, A.S., Ramos De Carvalho, F.F., Arruda Dos Santos, G.R., Souza Alves, K. & De Souto Maior Jr., R.J. 2005. Substituição do Milho por Farelo de Palma Forrageira em Dietas de Ovinos em Crescimento Desempenho. *Rev. Bras. Zootec.*, 34(1): 249–256.
- Vergara, C., Saavedra, J., Sáenz, C., García, P. & Robert, P. 2014. Microencapsulation of pulp and ultrafiltered cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) extracts and betanin stability during storage. *Food Chem.*, 157: 246–251.
- Vessels, H.K., Bundy, C.S. & McPherson, J.E. 2013. Life history and laboratory rearing of *Narnia femorata* (Hemiptera: Heteroptera: Coreidae) with descriptions of immature stages. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 106(5): 575–585.
- Vieira, E. 1996. *Elementary food science*. Fourth Edition. B.V. Hathorne, Massachusetts, USA, Springer-Science, Business Media.
- Viguera, A.L. & Portillo, L. 2014. *Control de cochinilla Silvestre y Cría de Grana Cochinilla*. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Jalisco. 66 pp.
- Viguera, A.L., Portillo, L. & Flores, V.I. 1993. Influencia de los macro y microelementos aplicados a cladodios de *Opuntia ficus-indica* sobre el desarrollo de la cochinilla. *Quepo*, 7: 81–91.
- Volchansky, C.R., Hoffmann, J.H. & Zimmermann, H.G. 1999. Host-plant affinities of two biotypes of *Dactylopius opuntiae* (Homoptera: Dactylopiidae) enhanced prospects for biological control of *Opuntia stricta* (Cactaceae) in South Africa. *J. Appl. Ecol.*, 36: 85–91.
- Walkington, D.L. 1968. The taxonomic history of southern California Prickly Pears. *Cact. Succ. J. (Los Angeles)*, 40: 186–192.
- Walters, M., Figueiredo, E., Crouch, N.R., Winter, P.J.D., Smith, G.F., Zimmermann, H.G. & Mashope, B.K. 2011. Naturalised and invasive succulents of southern Africa. *Abc Taxa*, 11 (available at www.abctaxa.be).
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O. & Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389–395.
- Wang, N. & Nobel, P.S. 1996. Doubling the CO₂ concentration enhances the activity of carbohydrate-metabolism enzymes, source carbohydrate production, photoassimilate transport, and sink strength for *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.*, 110: 893–902.
- Wang, X., Felker, P. & Paterson, A. 1997. Environmental influences on cactus pear fruit yield, quality and cold hardiness and development of hybrids with improved cold hardiness. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 2: 48–59.
- Wang, X., Felker, P., Burrow, M.D. & Paterson, A.H. 1998. Comparison of RAPD marker patterns to morphological and physiological data in the classification of *Opuntia* accessions. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 3–14.
- Wang, X., Felker, P., Burrow, M.D. & Paterson, A.H. 1999. Comparison of RAPD marker patterns to morphological and physiological data in the classification of *Opuntia* accessions. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3: 3–15.
- Weedin, J.F. & Powell, A.M. 1978. Chromosome numbers in Chihuahuan desert Cactaceae. *Trans-Pecos Texas. Am. J. Bot.*, 65: 531–537.
- Weiss, J., Nerd, A. & Mizrahi, Y. 1993a. Vegetative parthenocarpy in the cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) *Ann. Bot.*, 72(6): 521–526.
- Weiss, Y., Edelman, S. & Fahle, M. 1993b. Models of perceptual learning in vernier hyperacuity. *Neural Comput.*, 5: 695–718.
- Wessels, A.B. 1988a. *Spineless prickly pears*. Johannesburg, South Africa, Perksor. 61 pp.
- Wessels, A.B. 1988b. Snoei, vruguitdunning, vrugontwikkeling en vrugkwaliteit van doringlose turksyve. In Proceedings of the First National Symposium on Fruit Production of Spineless Prickly Pears, 2–4 February 1988, University of Pretoria, South Africa, pp. 12–20.
- Wessels, A.B. 1988c. Geografiese verspreiding van die doringlose turksyve *Opuntia ficus-indica* Mill. In Proceedings of the First National Symposium on Fruit Production of Spineless Prickly Pears, 2–4 February 1988, University of Pretoria, South Africa, pp. 1–6.
- Wessels, A.B. 1988d. *Kritiese evaluering van 'n aantal doringlose turksyvekultivars*. In Proceedings of the First National Symposium on Fruit Production of Spineless Prickly Pears, 2–4 February 1988, University of Pretoria, South Africa, pp. 21–24.
- Wessels, A.B. 1989. *Morfogenese en potensiaal van die turksyvvrug (Opuntia ficus-indica (L.) Mill.)*. Pretoria, South Africa, Department of Horticulture, University of Pretoria (DSc thesis). 248 pp.
- Wessels, A.B. 1992a. Turksyve vir die mark (1): klimaat en kultivars. *Landbouweekblad*, 4 Sept.: 40–41.
- Wessels, A.B. 1992b. Turksyve vir die mark (4): Pluk, hantering en verpakking. *Landbouweekblad*, 25 Sept.: 34–37.
- Wessels, A.B. & Swart, E. 1990. Morphogenesis of the reproductive bud and fruit of the prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L. Mill. cv Morado). *Acta Hort.*, 275: 245–253.
- Wessels, A.B., Van Der Merwe, L.L. & Du Plessis, H. 1997. Yield variation in clonally propagated *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. plants when terminal cladodes are used. *Acta Hort.*, 438: 73–76.
- White Dove Farm. 2015. *The living cactus fence: Botanical name: Opuntia violacea santa rita. Common name: Blue Opuntia* (available at <http://www.whitedovesfarmfresh.com/Cactus-Fencing-Opuntia-and-Prickly-Pear-Cereus-White-Dove-Farm.html>).
- Wiese, J., McPherson, S., Odden, M.C. & Shlipak, M.G. 2004. Effect of *Opuntia ficus-indica* on symptoms of the alcohol hangover. *Arch. Intern. Med.*, 164: 1334–1340.
- Winckler, G. 2002. *The CCD as a strategic framework for natural resource management in dry zones - Mainstreaming the CCD, and synergies between the conventions*. Proceedings of the 12th ISCO Conference, Volume IV, 26–31 May 2002, Beijing, China. 651 pp.
- Winston, R.L., Schwarzländer, M., Hinz, H.L., Day, M.D., Cock, M.J.W. & Julien, M., eds. 2014. *Biological control of weeds: A world catalogue of agents and their target weeds*. 5th Edition. Morgantown, West Virginia, USDA Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team. 838 pp.
- Wolfram, R.M., Kritz, H., Efthimiou, Y., Stomatopoulos, J. & Sinsinger, H. 2002. Effect of prickly pear (*Opuntia robusta*) on glucose- and lipid-metabolism in non-diabetics with hyperlipidemia-a pilot study. *Wien. Klin. Wochenschr.*, 114: 840–846.
- Wolfram, R.M., Budinsky, A., Efthimiou, Y., Stomatopoulos, J., Oguogho, A. & Sinsinger, H. 2003. Daily prickly pear consumption improves platelet function. *PLEFA*, 69: 61–66.
- Wolstenholme, B.N. 1977. A simple climatic classification for tropical and sub-tropical areas and fruits in South Africa. *Crop Prod.*, 6: 35–39.
- Wright, N. 1963. A thousand years of cochineal. A lost but traditional Mexican industry on its way back. *Am. Dyest. Rep.*, 52: 53–62.
- Wu, L.C., Hsu, H.W., Chen, Y.C., Chiu, C.C., Lin, Y.I. & Ho, J.A. 2006. Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. *Food Chem.*, 95: 319–327.
- Yahia, E.M. & Mondragón, J.C. 2011. Nutritional components and anti-oxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Food Res. Int.*, 44: 2311–2318.
- Yahia, E.M. & Sáenz, C. 2011. Cactus pear (*Opuntia* species). In E.M. Yahia, ed. *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*, Vol. 2, pp. 290–329. Cambridge, UK, Woodhead Publishing.
- Yahia, E.M., Ornelas, J. de J. & Anaya, A. 2009. Extraction and chemical characteristics of mucilage from mesquite, Aloe vera, maguay and prickly pear cactus cladodes (nopál) and evaluation of its prebiotic effect on the growth of 2 probiotic bacteria. *Acta Hort.*, 841: 625–628.
- Yáñez Fernández, J., Salazar Montoya, J.A., Chaires Martínez, L., Jiménez Hernández, J., Márquez Robles, M. & Ramos Ramírez, E.G. 2002. Aplicaciones biotecnológicas de la microencapsulación. *Avance y Perspectiva*, 21: 313–319.
- Yang, N., Zhao, M., Zhu, B., Yang, B., Chen, C., Cui, C. & Jiang, Y. 2008. Anti-diabetic effects of polysaccharides from *Opuntia monacantha* cladode in normal and streptozotocin-induced diabetic rats. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 9: 570–574.
- Zeeman, D.Z. 2005. *Evaluation of sun-dried Opuntia ficus-indica var. Algerian cladodes in sheep diets*. Bloemfontein, South Africa, University of the Free State (MSc dissertation).
- Zegbe Dominguez, J.A. & Mena Covarrubias, J.M. 2006. *Modificación de la floración, maduración y época de cosecha del nopal tunero (Opuntia spp.)*. Folleto Científico No. 8. Zacatecas, Mexico, INIFAP.
- Zegbe Dominguez, J.A. & Mena Covarrubias, J. 2009. Flower bud thinning in 'Rojo Liso' cactus pear. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 84: 595–598.
- Zegbe Dominguez, J.A. & Mena Covarrubias, J. 2010a. Two reproductive bud thinning alternatives for cactus pear. *HortTechnol.*, 20: 202–205.
- Zegbe Dominguez, J.A. & Mena Covarrubias, J. 2010b. Postharvest changes in weight loss and quality of cactus pear undergoing reproductive bud thinning. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 12: 1–11.
- Zegbe Dominguez, J.A., Serna Perez, A. & Mena Covarrubias, J. 2014. Mineral nutrition enhances yield and affects fruit quality of 'Cristalina' cactus pear. *Sci. Hortic.*, 167: 63–70.
- Zegbe Dominguez, J.A., Serna Perez, A. & Mena Covarrubias, J. 2015. Irrigation enhances postharvest performance of 'Cristalina' cactus pear fruit. *Acta Hort.*, 1067: 417–422.
- Zemon, J. 2015. *The desert cactus. Cactus is an American plant* (available at <http://www.desertusa.com/cactus/the-cactus.html>).

- Zimmermann, H.G. 2010. *Notes on cactus invasions in Namibia*. FAO Report UTF/NAM/004/NAM. 20 pp.
- Zimmermann, H.G. 2011. History of invasive succulent plants in the region. *Abc Taxa*, 11: 13–19.
- Zimmermann, H.G. & Granata, G. 2002. Insect pests and diseases. In P.S. Nobel, ed. *Cacti: Biology and uses*, pp. 235–254. Berkeley, CA, USA, University of California Press.
- Zimmermann, H.G. & Moran, V.C. 1982. Ecology and management of cactus weeds in South Africa. *S. Afr. J. Sci.*, 78: 314–320.
- Zimmermann, H.G., Moran, V.C. & Hoffmann, J.H. 2001. The renowned cactus moth, *Cactoblastis cactorum* (Lepidoptera, Pyralidae): its natural history and threat to native *Opuntia* floras in Mexico and the United States. *Diversity and Distribution*, 6: 259–269.
- Zimmermann, H.G., Moran, V.C. & Hoffmann, J.H. 2009. Invasive cactus species (Cactaceae). In R. Muniappan, G.V.P. Reddy & A. Raman, eds. *Biological control of tropical weeds using arthropods*, pp. 108–129. Cambridge University Press.
- Zoghalmi, N., Chrita, I., Bouamama, B., Gargouri, M., Zemni, H., Ghorbel, A. & Mliki, A. 2007. Molecular based assessment of genetic diversity within Barbary fig (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) in Tunisia. *Sci. Hortic.*, 113: 134–141.
- Zou D.M., Brewer, M., Garcia, F., Feugang, J.M., Wang, J., Zang, R., Liu, H. & Zou, C.P. 2005. Cactus pear – a natural product in cancer chemoprevention. *Nutr. J.*, 4: 25–29.
- Zourgui, L., El Golli, E., Bouaziz, C., Bacha, H. & Hassen, W. 2008. Cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes prevent oxidative damage induced by the mycotoxin zearalenone in Balb/C mice. *Food Chem. Toxicol.*, 46: 1817–1824.
- Zuñiga Tarango, R., Orona Castillo, I., Vázquez Vázquez, C., Murillo Amador, B., Salazar, E., López Martínez, J.D., García Hernández, J.L. & Rueda Puente, E. 2009. Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus indica* L. Mill. en diferentes tratamientos de Fertilización. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 11: 53–68.



ISBN 978-92-5-130344-3



9 789251 303443

I7628FR/1/02.18